

Tadeusz Uhl, Ireneusz Łuczak, Grzegorz Brożek, Adolf Polak, Andrzej Chmielewski

Zderzaki elastomerowe do tramwajów

Jedną z najczęściej występujących w praktyce przyczyn uszkodzenia pudła pojazdu tramwajowego jest najechnięcie na siebie dwóch tramwajów poruszających się w tym samym kierunku. Skala tego problemu była powodem podjęcia prac nad minimalizacją skutków najechnięcia, niezależnie od działań organizacyjnych, dyscyplinujących czy motywacyjnych motorniczych do zachowania należytej ostrożności. Zastosowanie zespołów o dużej energii pochłaniania, włączonych szeregowo w ciąg elementów stanowiących o wytrzymałości wagonu na obciążenia wzdłużne, jest w zasadzie jedynym technicznym, skutecznym rozwiązaniem tego problemu, dostępnym w chwili obecnej. W Polsce produkowane są aparaty pochłaniające energię, których konstrukcja i technologia produkcji opracowana została przez KAMAX S.A.

Za rozwiązaniem technicznym wdrażanym w wagonach przemieszczenia przede wszystkim analiza kosztów usuwania skutków kolizji. Naprawy te kosztują, bowiem kilka tysięcy złotych, a więc stosunkowo niedużo, przy czym w rachunku tym nie ma strat z tytułu wyłączenia wagonów z ruchu. Uciążliwość tych zderzeń polega bowiem głównie na ich liczności, czasie wyłączenia z eksploatacji oraz konieczności zaangażowania różnych technik warsztatowych dla dokonania naprawy.

Założenia wstępne Statystyka zderzeń

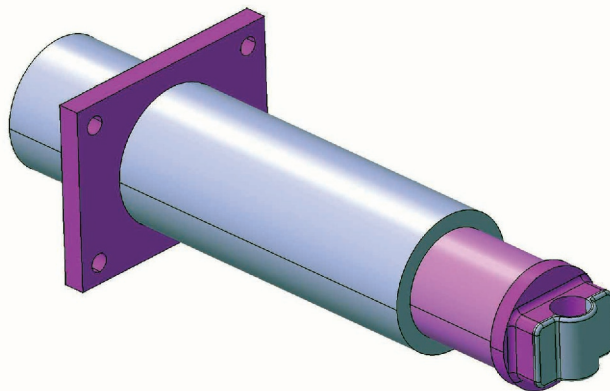
Dane dotyczące częstości powtarzania się i kosztów skutków najechnięcia zebrano w przedsiębiorstwach komunikacji tramwajowej. Ze względu na to, że sposób rejestracji zdarzeń, jak również kosztów napraw jest odmienny w różnych przedsiębiorstwach, wybrano lata 1996–1998, dla których uzyskane dane miały charakter na tyle jednolity, aby można było wysnuć wspólne wnioski. Dane statystyczne zebrane w jednym z zakładów napraw tramwajów przedstawiono w tablicy 1.

Koszty napraw poniesionych z tytułu naprawy uszkodzeń powypadkowych, będących skutkiem kolizji przedstawiono w tablicy 2.

Aparat pochłaniający energię

Do rozwiązań pochłaniających energię uderzeń w pojazdach szynowych, należy zaliczyć rozwiązanie fabryki Urządzeń Mechanicznych KAMAX S.A. – aparat zderzeniowy KX-TR-1 (rys. 1). Charakteryzuje się on wysoką stabilnością parametrów i niezawodnością

działania w dużym zakresie temperatur (od -40°C do $+50^{\circ}\text{C}$). Zastosowany w tym elemencie elastomer KAMAXIL[®] nie traci swoich właściwości przez czas życia pojazdu. Element zderzny jest wyposażony w amortyzator główny (elastomerowy) oraz strefę pochłaniania energii realizowaną przez zgniot przetłoczonych wkładek stalowych.



Rys. 1. Aparat zderzeniowy produkcji KAMAX S.A.

Założenia konstrukcyjne

Projektowana konstrukcja zderzaka tramwajowego musi spełniać wiele założeń dotyczących zarówno samej konstrukcji zderzaka, jak i warunków ekonomicznych, takich jak:

- ochrona konstrukcji pudła tramwaju;
- zwiększenie bezpieczeństwa motorniczego oraz pasażerów;
- kształt umożliwiający współpracę z obecnie eksploatowanymi i produkowanymi tramwajami;
- w zakresie prędkości mniejszych niż 18 km/h pochłanianie energii realizowane jest przez amortyzator elastomerowy, aż do wyczerpania zakresu pracy (skoku);
- przy prędkościach zderzeń większych niż 18 km/h następuje zerwanie bezpieczników i zgniot stalowych wkładek umieszczonych wewnątrz amortyzatora, dla znacznie większych prędkości odbijak odkształca się plastycznie;
- zderzak powinien umożliwić częściowe zredukowanie skutków zderzenia z tramwajem 105N ze zderzakiem starego typu (gumowy odbijak);
- w ograniczonym do ok. 50% zakresie skuteczności aparat zderzeniowy przeciwdziała skutkom kolizji z tramwajem nie wyposażonym w tego typu urządzenie.

Założenia ekonomiczne konstrukcji zderzaka można określić jako ograniczenie kosztów napraw powypadkowych, co sprawdza się do:

Tablica 1

Dane statystyczne dotyczące najechnięcia

Rok	Analizowane wozy-km	Liczba zderzeń	Liczba zderzeń /Mwozy-km
1996	43 572 000	52	1,19
1997	43 294 000	64	1,48
1998	44 455 000	60	1,35
Razem	13 1321 000	176	1,34*

* Wskaźnik średni.

Tablica 2

Średnie koszty napraw powypadkowych będących skutkiem najechnięcia

Koszty w latach [zł]	1996	1997	1998	Średni koszt jednostkowy [zł]
Koszty napraw	260 502	200 030	393 038	
Koszt jednostkowy naprawy	5010	3125	6551	4895,25

- zmniejszenia pracochłonności napraw powypadkowych,
- zwiększenia dyspozycyjności taboru (podwyższenia wskaźnika gotowości technicznej),
- zmniejszenia liczby zderzeń wymagających napraw,
- zmniejszenia kosztów utrzymania,
- zmniejszenia kosztów ubezpieczeń komunikacyjnych.

Cena jednego zderzaka nowego typu dla tramwaju 105N powinna być możliwie niska.

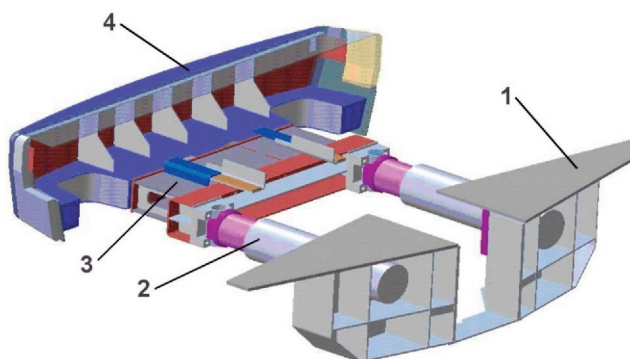
Opis konstrukcji zderzaka

Montaż aparatu zderzeniowego nie ingeruje w zabudowę innych urządzeń w tramwaju typu 105. Wymaga jedynie wstawienia ramy oporowej zintegrowanej z wieszakiem sprzęgu.

Zmiany konstrukcji czołownicy polegają na wycięciu dolnych pótek ramion czołownicy i wstawieniu w to miejsce ramy oporowej zderzaka. Rama ta jest również przyspawana do belki grzbietowej i wieszaka sprzęgu.

Uwzględniając założenia techniczne, opracowano koncepcję zderzaka składającego się z następujących elementów:

- 1) ramy oporowej (1 na rys. 2), przyspawanej do ramion czołownicy;
- 2) aparatów zderzeniowych (2 na rys. 2), pochłaniających energię zderzenia (prod. KAMAX S.A.);
- 3) elementu pośredniczącego (3 na rys. 2);
- 4) części przedniej, zwanej odbijakiem (4 na rys. 2).



Rys. 2. Zmodernizowana konstrukcja zderzaka

Rama oporowa została wykonana z blach stalowych grubości 5 i 10 mm. Wprowadzone zostały uchwyty do zamocowania elementów elastomerowych oraz żebra wzmacniające dla równomiernego przenoszenia obciążeń w czasie zderzenia do czołownicy i belki grzbietowej ramy tramwaju.

Elementami pochłaniającymi energię zderzenia w zaproponowanej konstrukcji są aparaty zderzeniowe KX-TR-1.

Element pośredniczący zawiera:

- uchwyty, które wraz z odpowiednimi uchwyty aparatów zderzeniowych tworzą przegub uniemożliwiający odkształcanie w kierunku poprzecznym;
- prowadnice, które zapewnią, w przypadku zderzeń z pojazdem o zderzaku położonym wyżej, zabezpieczenie przed zginaniem aparatów zderzeniowych i możliwe osiowe przenoszenie siły na elementy elastomerowe;
- elementy mocujące odbijak.

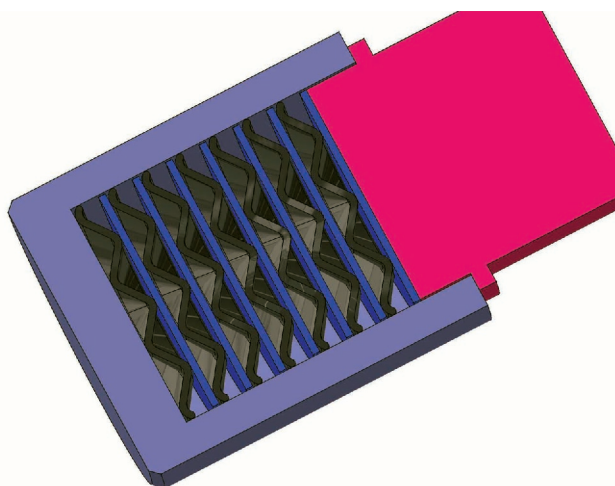
Element pośredniczący jest wykonany jako konstrukcja spawana z blach 3–5 mm. Jeden z uchwytów elementu pośredniczącego ma tzw. faskolkowy otwór, co pozwala na dopasowywanie się zderzaka do lokalnych warunków zderzenia.

Odbijak wykonano jako element, który jest łatwo demontowalny przez wysuwanie, czas demontażu wynosi ok. 1 min. W tym przypadku tramwaj podnoszony jest przez specjalne adaptery umożliwiające podnoszenie bez konieczności demontażu odbijaka. Do przedniej części odbijaka przyklejona jest warstwa tworzywa, która pozwoli kształtować lokalne warunki zderzenia, dopasować zderzak do obrysu i kształtu pojazdu oraz służy jako element pochłaniający energię zderzenia przy mniejszych prędkościach (np. pchnięcia manewrowe). Odbijak został odpowiednio ukształtowany w celu uniknięcia kolizji z kieszeniami służącymi do podnoszenia pojazdu w przypadku zderzenia (odbijak będzie się cofał o ok. 95–100 mm).

Dla podniesienia bezpieczeństwa pasażerów, motorniczego oraz ochrony konstrukcji pudła tramwaju uzupełniono konstrukcję zderzaka o elementy stanowiące kontrolowane strefy zgniotu. Ich rolę, przy zderzeniach z prędkościami powyżej 18 km/h, będą pełnić pochłaniacze energii wbudowane w aparaty zderzeniowe, działające na zasadzie odkształceń plastycznych.

Testowane były dwa typy pochłaniaczy:

- 1) elementy wykonane jako wkładki kształtowe z krążkami płaskimi (rys. 3) ze stali o podwyższonej granicy plastyczności; przewidywana była możliwość wykonywania różnych konfiguracji (z przekładkami w postaci płaskich krążków, z różną liczbą wkładek kształtowych oraz z różnymi okresami fali przetłoczenia); badania możliwych zestawień zostały przedstawione w dalszej części artykułu; w badaniach modelowych przyjęto własności materiałowe stali o następujących parametrach: moduł Younga $E = 210\ 000\ \text{MPa}$, $Re = 205\ \text{MPa}$, $Rm = 295\ \text{MPa}$;
 - 2) elementy wykonane ze spienionego siluminu o objętości pęcherzy powietrza ok. 45% (rys. 4); badany element z siluminu miał następujące własności materiałowe: moduł Younga $E = 70\ 000\ \text{MPa}$, $Re = 150\ \text{MPa}$, $Rm = 205\ \text{MPa}$.
- Tak wykonane modele posłużyły do badań symulacyjnych.

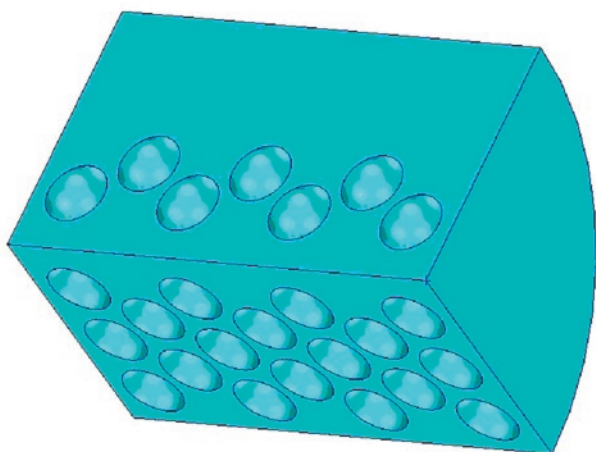


Rys. 3. Przekrój pochłaniacza energii z wkładkami kształtowymi i płaskimi krążkami

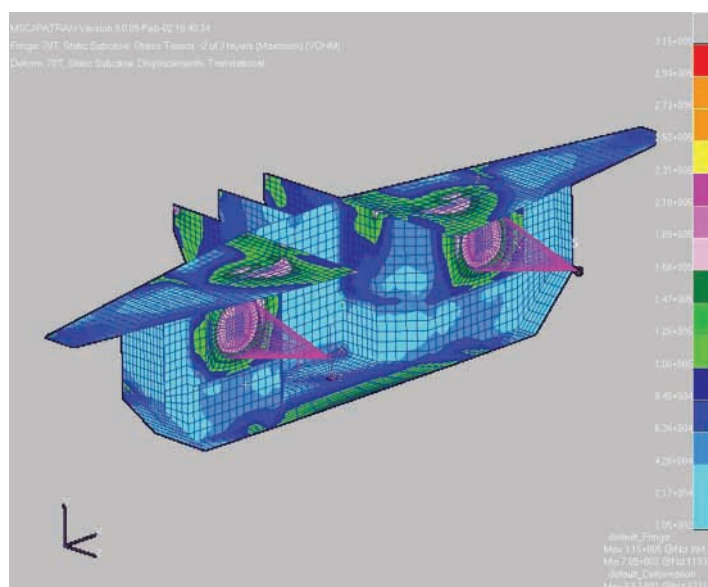
Symulacyjne badania własności zderzaka

Badania własności ramy oporowej i odbijaka

Za pomocą oprogramowania MSC.Nastran/Patran zostały wykonane analizy metodą elementów skończonych odbijaka i ramy oporowej mająca na celu wyznaczenie naprężeń, odkształceń oraz miejsc krytycznych.



Rys. 4. Przekrój pochłaniacza energii ze spienionego siluminu (model CAD)



Rys. 5. Naprężenia zredukowane dla ramy опорowej

Model ramy опорowej został utwierdzony w sposób symulujący połączenie z belką grzbietową oraz poddany obciążeniu w miejscu połączenia z elementami pochłaniającymi energię (odpowiadającemu naciskom 700 kN wywieranym przez zderzak). Wartości naprężeń zredukowanych dla ramy опорowej przedstawiono na rysunku 5.

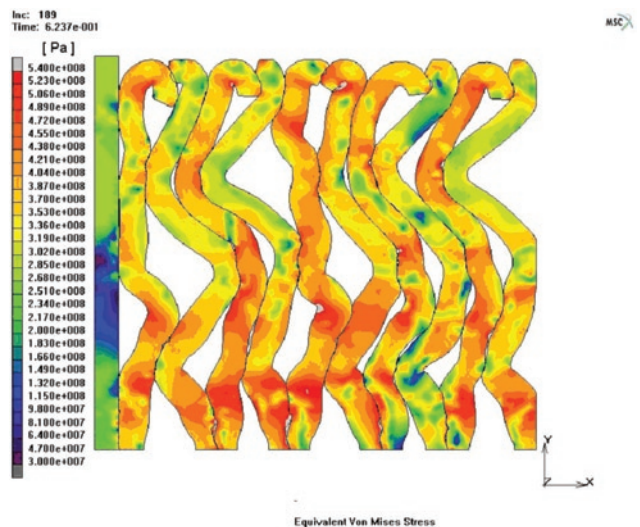
Odbijak utwierdzony został w miejscu połączenia z elementami zderznymi, natomiast przyłożona siła reprezentuje naciski powstające podczas zderzenia. Wartości odkształceń dla odbijaka przedstawiono na rysunku 6.

Uzyskane wyniki wskazują na wystarczającą wytrzymałość konstrukcji przy założonym wektorze obciążeń.

Badanie pochłaniacza energii

Badanie pochłaniacza energii zostało wykonane przy użyciu oprogramowania MSC.Marc/Mentat, mającego szerokie zastosowanie do badania zjawisk nieliniowych. Analiza miała na celu określenie ilości pochłoniętej energii plastycznej wskutek ruchu tłoka obciążającego.

Do potrzeb symulacji pochłaniacza z wkładek kształtowych został wykonany model osiowo-symetryczny (rys. 7).



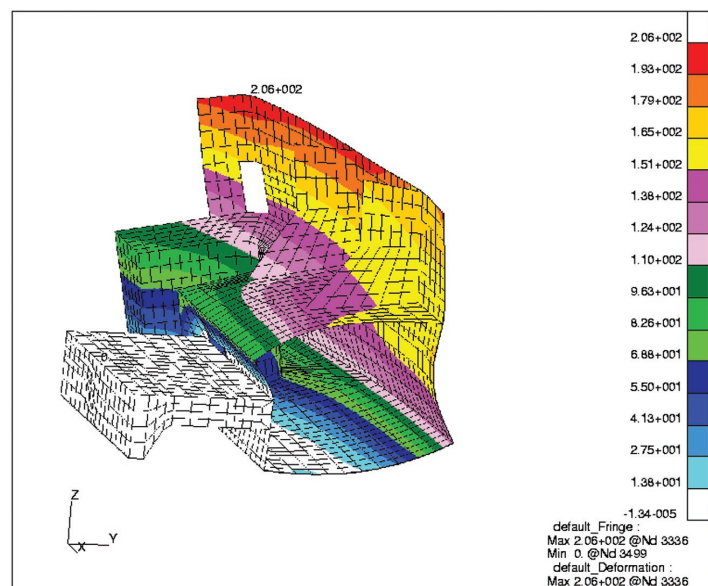
Rys. 7. Naprężenia zredukowane dla modelu z wkładkami kształtowymi po zgnieciu

Wykonane analizy pozwoliły określić stopień deformacji, występujące siły oraz stopień pochłaniania energii. Umożliwiło to optymalizację ilości, stopnia, kąta przetłoczeń oraz grubości.

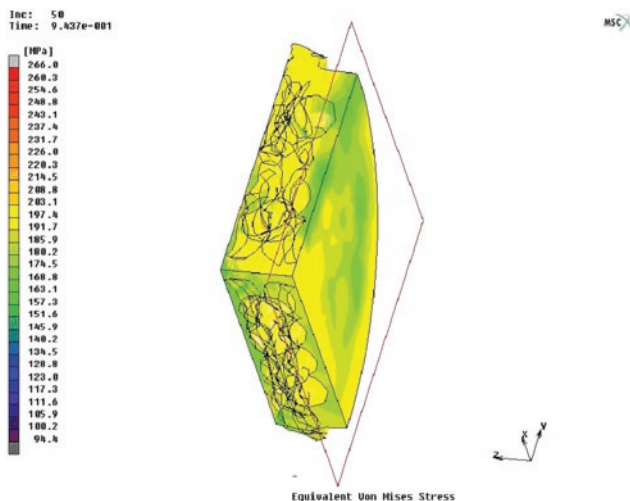
Rozkład pęcherzy dla modelu ze spienionego siluminu nie mógł być zamodelowany w dokładny sposób ze względu na ich losowy charakter, wobec tego została zachowana gęstość względna. Pęcherze zostały ułożone w kolumny i pierścienie. W celu skrócenia czasu analiz rozpatrywano zachowanie ćwiartki modelu walcowego przy zachowaniu odpowiednich warunków brzegowych.

Odształcenia modelu ze spienionego siluminu, widoczne na rysunku 8, są wystarczające do uznania takiego modelu za odpowiadający rzeczywistości.

Pomimo odstępstwa w odwzorowaniu geometrii modelu rzeczywistego, uzyskano wyniki symulacji, które w porównaniu z wynikami badań symulacyjnych należy uznać za wystarczająco dobrze opisujące zachowanie się rzeczywistej konstrukcji.



Rys. 6. Odształcenia odbijaka



Rys. 8. Naprężenia zredukowane dla modelu ze spienionego siluminu

Badania eksperymentalne pochłaniaczy energii

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w firmie KAMAX S.A., która posiada laboratorium przystosowane do badania zjawisk rozpraszania energii przy uderzeniach.

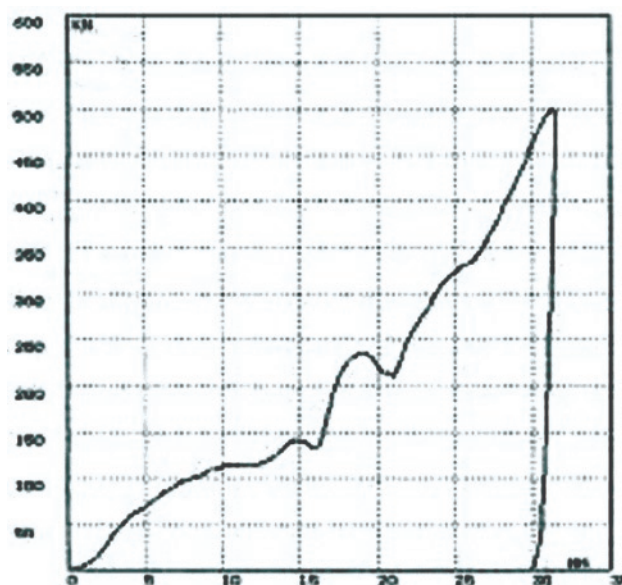
Do badań pochłaniacza energii z wkładek stalowych zostało użyte urządzenie KAFAR, pozwalające na realizację obciążenia uderzeniem oraz uzyskanie znaczących energii i prędkości części uderzających. Wymiary badanej próbki odpowiadały wymiarom docelowej przestrzeni w aparacie zderzeniowym, mianowicie cylindrowi o wysokości i średnicy 70 mm. Wyniki dla testu fizycznego i analizy metodą elementów skończonych są zbliżone. Różnica w pochłoniętej energii obliczonej i zmierzonej wynosi 6%, przy energii pochłoniętej w czasie realizacji testu laboratoryjnego na poziomie 6 kJ.

Kształt odkształconych wkładek, widoczny na rysunku 10, oraz stopień deformacji jest zbliżony z wynikami symulacji.

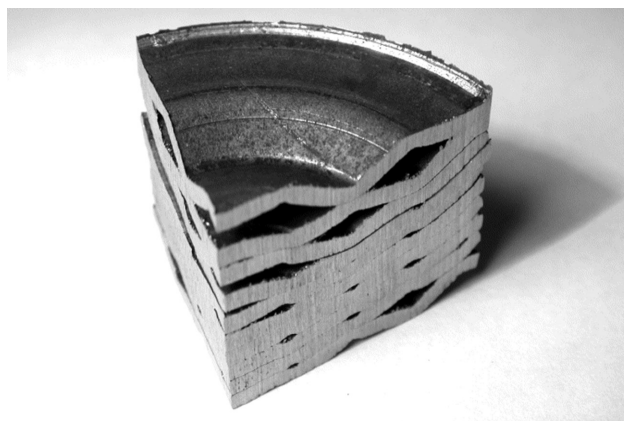
Badania dla modelu ze spienionego siluminu zostały wykonane na stanowisku badawczym wyposażonym w siłowniki firmy Schenck, o maksymalnej sile osiowej 40 kN. Badana próbka miała kształt walca o wysokości 60 mm i średnicy 23 mm. Warunki testu, podobnie jak i dla analizy metodą elementów skończonych, różniły się od rzeczywistych warunków eksploatacji, badana próbka nie była umieszczona w cylindrze ograniczającym jej poprzeczną deformację. Wykres przedstawiony na rysunku 11 pozwala na obliczenie pochłoniętej energii.

Uzyskana z eksperymentu wartość pochłoniętej energii wynosi 600 J, a wysokość próbki po teście wynosi 9 mm (rys. 12). W wyniku symulacji odkształcenia próbki metodą elementów skończonych uzyskano wartość pochłoniętej energii 750 J, natomiast wysokość próbki po odkształceniu 11 mm. Różnica wyników symulacji i eksperymentu w zakresie pochłoniętej energii sięga 20%, co przy przybliżonych parametrach modelu fizycznego (przybliżone, literaturowe dane materiałowe) należy uznać za wynik pozytywny. Wymiary cylindra w aparacie zderzeniowym pozwalają na umieszczenie w nim siedmiu sztuk spienionych elementów pochłaniających energię.

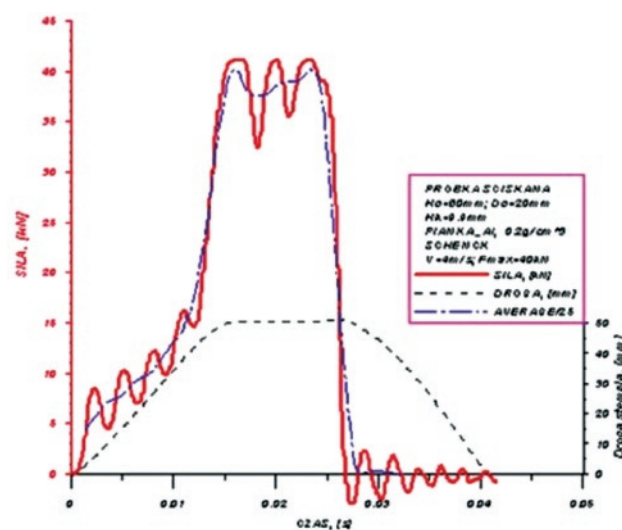
Stosunek objętości próbki elementu pochłaniającego energię uderzenia ze spienionego siluminu i odkształcalnych elementów stalowych do ilości pochłoniętej energii wskazuje na przewagę elementu spienionego.



Rys. 9. Przebieg siły powodującej odkształcenia w funkcji odkształcenia po uderzeniu na maszynie KAFAR



Rys. 10. Wkładki stalowe po uderzeniu na maszynie KAFAR



Rys. 11. Wykres najważniejszych parametrów testu laboratoryjnego

Weryfikacja analiz testem zderzeniowym

Wykonany prototyp zderzaka został zamontowany do przygotowanej czołownicy tramwaju (rys. 13, 14), a następnie została prze-

przewodzona próba zderzeniowa na terenie Warszawskich Zakładów Naprawy Tramwajów.

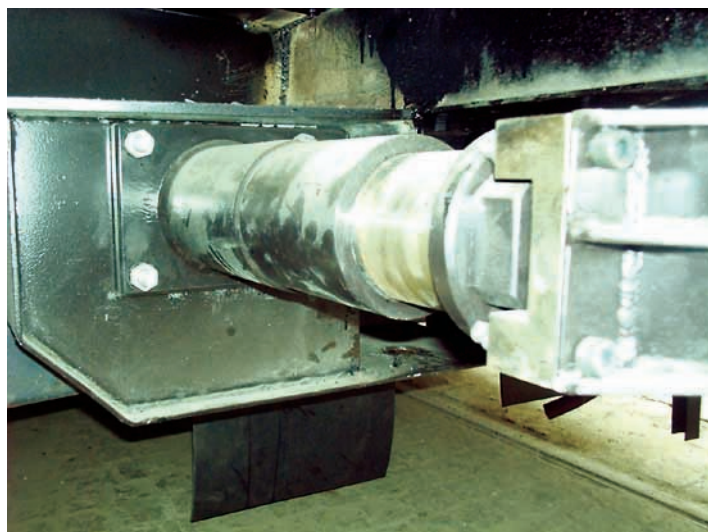
Próbie przeprowadzano na dwóch pustych wagonach tramwajowych typu 105N. Tramwaj najeżdżający został wyposażony w zderzak zmodyfikowany, tramwaj najeżdżany natomiast w standardowy zderzak gumowy.



Rys. 12. Odsztatcona próbka ze spienionego siluminu



Rys. 13. Zderzaka zamontowany z przodu na testowanym tramwaju



Rys. 14. Element zderzny zamocowany na ramie oporowej

Testy potwierdziły założenia konstrukcyjne. Tramwaje zderzyły się przy prędkości ok. 18 km/h, po czym sprężyście się od siebie odbiły. Nie zaobserwowano żadnych uszkodzeń w strukturze zderzaka, ani – jak to miało miejsce poprzednio – w ścianie i szybie czołowej. Całą energię zderzenia pochłonęły aparaty zderzeniowe KX-TR-1 z wypełnieniem elastomerowym.

Montaż zderzaka oraz przeprowadzone próby zderzeniowe pozwoliły na dokonanie obserwacji, które umożliwiły modyfikację konstrukcji i geometrii zderzaka. Zmiany te wynikały głównie z możliwości montażowych zderzaka i konieczności uproszczenia jego konstrukcji. Główne działania, jakie podjęto, do uzupełnienia konstrukcji zderzaka to:

- zespolenie odbijaka i elementu pośredniczącego;
- wykonanie boków odbijaka jako elementów przykręcanych (ze względu na duży udział zderzeń boczno-czołowych), z możliwością szybkiego montażu i demontażu tego elementu;
- założono, że zintegrowany odbijak będzie zdejmowany przez demontaż sworzni łączących go z elementami elastomerowymi.

Kształt samego zderzaka pozostał niezmiennym. Zaproponowano maskowanie przerwy między zderzakiem a obdachowaniem pojazdu za pomocą harmonijkowego mieszka ochronnego.

Inne modyfikacje dotyczyły głównie zabudowy i rodzaju sprzęgu. Założono, że wraz z montażem nowego zderzaka będzie się demontować stary sprzęg i zakładać nowy, składany sprzęg, pozwalający na odpowiednie zmiany geometrii zderzaka.

Większość zmian wpłynęła na opracowanie nowej koncepcji geometrii odbijaka, który został wykonany jako konstrukcja modułowa (środek oraz dwa dokręcane boki).

W geometrii ramy oporowej również wprowadzono niewielkie zmiany. Wynikały one z obaw o możliwość kolizji ramy z elementami konstrukcji tramwaju umieszczonymi pod podwoziem (wynikających np. z tolerancji wykonania). Dla wzmocnienia osłabionej konstrukcji wprowadzono dwa żebra, które będą dospawane do wieszaka sprzęgu. Zmodernizowaną konstrukcję zderzaka przedstawiono na rysunku 15.

Przedstawiona na rysunku 15 konstrukcja zderzaka została przebadana i może być montowana na wozach tramwajowych, zabezpieczając ich konstrukcję w zakresie ochrony pudła i ramy przy zderzeniach do 18 km/h.

Wnioski

Zmodernizowana konstrukcja zderzaka daje duże możliwości dalszego rozwoju. Przede wszystkim prace te powinny być skierowane na badanie możliwości szerszego wykorzystania pochłaniaczy energii zbudowanych ze spienionego siluminu. W przyszłości planuje się wypełnić nim nie tylko pustą przestrzeń aparatu zderzeniowego, lecz także wolne przestrzenie odbijaka. Zaletą tego typu rozwiązania jest brak konieczności stosowania elementu prowadzącego typu tłok, który jest niezbędny w przypadku pochłaniacza zbudowanego z wkładek stalowych.

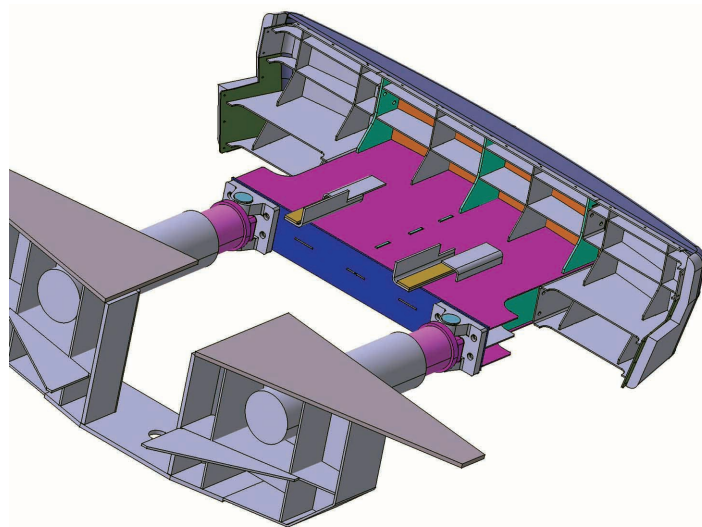
Obecnie, po uwzględnieniu możliwości technologicznych, zdecydowano się na zastosowanie oprócz KAMAXIL[®]u odsztatczalnych stalowych wkładek. Do dalszego badania i rozwoju konstrukcji plastycznie odsztatczalnej części pochłaniacza energii, jak i całego zderzaka zostanie wykorzystana metoda elementów skończonych, która – jak wykazały przeprowadzone badania weryfikacyjne – daje możliwość szybkiej weryfikacji zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

W projekcie zostało spełnione bardzo ważne kryterium projektowania konstrukcji pojazdów dotyczące kosztów wytwarzania. Cena zmodernizowanego zderzaka jest porównywalna z kosztami napraw w wyniku najechania na siebie dwóch tramwajów, co prognozuje szerokie zastosowanie tego typu rozwiązania.



Literatura

- [1] Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z.: *Wytrzymałość materiałów*. WNT. Warszawa 1997.
- [2] Gere J.M., Timoshenko S.P.: *Mechanics of materials*.
- [3] Cheltenham, Stanley Thornes (Publishers) Ltd 1999.
- [4] Walczak J.: *Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności*. PWN. Warszawa 1978.
- [5] Benouali A.H, Froyen L.: *On the mechanical and microstructural parameters of aluminium foams* (w): Cellular Metals and Metal Flaming Technology. Ed. Banhart J., Ashby M., Fleck N., MIT Publishing, 2001.
- [6] Niezgodziński M., Niezgodziński E.: *Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe*. WNT. Warszawa 1996.
- [7] Pietrzyk M.: *Metody numeryczne w przeróbce plastycznej metali*. Wydawnictwa AGH. Kraków 1992.
- [8] Skrzypek J.: *Plastyczność i pełzanie*. PWN. Warszawa 1986.
- [9] MSC/Marc/Mentat Documentation.
- [10] <http://www.mscsoftware.com>



Rys. 15. Zderzak zmodernizowany po testach zderzeniowych

Podziękowanie

Autorzy składają podziękowanie Komitetowi Badań Naukowych za finansowanie badań w ramach projektu celowego nr 10T12 040 2000 C/5385. Jednocześnie dziękujemy Tramwajom Warszawskim za umożliwienie przeprowadzenia badań.

Autorzy

Tadeusz Uhl, Grzegorz Brożek – Akademia Górniczo-Hutnicza
Ireneusz Łuczak – Energocontrol Sp. z o.o.
Adolf Polak, Andrzej Chmielewski – KAMAX S.A.

III Międzynarodowa Konferencja Naukowa

Telematyka Systemów Transportowych

Katowice-Ustroń, 13–15 listopada 2003 r.

- Transportowe systemy zarządzania
- Inteligentne Systemy Transportowe
- Architektura ITS
- Usługi telematyki dla podróżnych,
- Wyposażenia pojazdów w środki telematyki
- Europejskie Programy Ramowe
- Sterowanie w systemach transportowych
- Urządzenia teletransmisji i telenawigacji
- Strategie wprowadzania rozwiązań telematyki transportu
- Systemy monitorowania ruchu
- Bezpieczeństwo w zarządzaniu i sterowaniu systemami transportowymi
- Symulacja systemów transportowych
- Standaryzacja telematycznych systemów transportowych
- Telematyka w usługach logistycznych
- Transport w kontekście wstąpienia nowych krajów do UE
- Ekonomia i polityka transportowa

Organizatorzy: Wydział Transportu Politechniki Śląskiej
Europejskie Centrum Doskonałości TRANSMEC
Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej
Wydział Transportu Politechniki Radomskiej
Wojewódzki Ośrodek Ruchu Drogowego w Katowicach

Informacje: Renata Skowrońska
Politechnika Śląska, Wydział Transportu, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8, tel./fax: (32) 603 43 65
e-mail: secretariat@tst-conference.org