



**Daniel
Wdowicz**

Próby potrąceniowe z użyciem manekinów pieszego. Manekin pieszego PRIMUS – konstrukcja i unikalne cechy

Streszczenie

W artykule pokrótce przedstawiono modele manekinów zderzeniowych pieszych, dzieląc je na manekiny stosowane typowo na potrzeby projektowania pojazdów oraz stosowane w badaniach rekonstrukcyjnych wypadków drogowych. Przedstawiono wybrane badania z dziedziny rekonstrukcji wypadków drogowych, w których wykorzystywane były manekiny pieszych. W drugiej części artykułu przedstawiono konstrukcję manekina PRIMUS – produktu od niedawna dostępnego na rynku. Opisano budowę manekina i podsumowanie badań weryfikujących jego odpowiedź dynamiczną w warunkach potrącenia oraz wymieniono potencjalne jego zastosowania, takie jak rekonstrukcje wypadków i badania eksperymentalne na potrzeby przemysłu.

Słowa kluczowe

Testy zderzeniowe, biomechanika, manekiny, PRIMUS, piesi, pasażerowie.

Otrzymano 25 lipca 2022 r., zatwierdzono do druku 28 listopada 2022 r.

DOI: 10.4467/15053520PnD.22.017.16987

1. Wstęp

Postęp w dziedzinie rekonstrukcji wypadków drogowych obejmuje nie tylko nowe techniki dokumentacji miejsca zdarzenia lub analizy danych powypadkowych, ale również rozwój manekinów zderzeniowych wykorzystywanych na potrzeby rekonstrukcji. Celem tego artykułu jest przybliżenie Czytelnikowi przykładowych konstrukcji manekinów zderzeniowych osób pieszych oraz opisanie nowego rozwiązania, jakie stanowi manekin PRIMUS niemieckiej firmy crashtest-service.com GmbH (CTS).

Manekin PRIMUS został wykorzystany w próbie potrącenia pieszego, przeprowadzonej w trakcie Konferencji „PIESZY – badania, dokumentacja, symulacje, bezpieczeństwo”, zorganizowanej przez CYBID sp. z o.o. sp. k. oraz Politechnikę

Mgr inż. Daniel Wdowicz, Politechnika Wrocławska, CYBID sp. z o.o. sp. k., ORCID: 0000-0001-7334-8110.

Krakowską w dniach 2–3 czerwca 2022 r. Był to pierwszy w Polsce eksperyment badawczy z wykorzystaniem takiego manekina. Manekin ten stanowi wyposażenie laboratorium badawczego CYBID i planowane jest jego wykorzystywanie w kolejnych próbach zderzeniowych i eksperymentach procesowych.

2. Manekiny pieszych

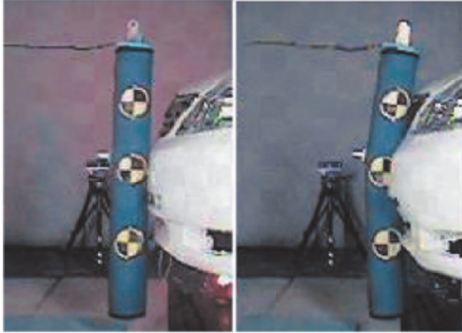
Manekiny pieszych można podzielić na dwie grupy: manekiny wykorzystywane typowo w przemyśle i badaniach naukowych na rzecz poprawy bezpieczeństwa biernego pieszych oraz manekiny wykorzystywane w rekonstrukcji i powiązanych badaniach. Podział ten jest czysto arbitralny i wprowadzony wyłącznie na potrzeby bieżącego artykułu, jednak pozwoli na zrozumienie różnic między dwiema grupami zastosowań.

Wymagania stawiane manekinom pierwszej grupy obejmują wysokie wymagania biozgodności oraz możliwość instalacji czujników (najczęściej przyspieszeniometry) wewnątrz ciała manekina. Informacje zebrane z manekina potrzebne są bowiem do oszacowania stopnia urazu i w rezultacie oceny danej konstrukcji, np. efektywności systemu aktywnej pokrywy silnika. W parze z tak postawionymi wymaganiami idzie także niestety bardzo wysoki koszt pojedynczego testu. Na marginesie, warto zauważyć, że manekiny pieszych, w przeciwieństwie do manekinów pasażerów, nie znalazły zastosowania w większości protokołów oficjalnych norm czy nawet testów konsumenckich. Przykładowo, w ramach testów zderzeniowych regulacji UN ECE R127/02 *Passenger Safety* [17] lub protokołu testowego EuroNCAP *Assessment Protocol – Vulnerable Road User Protection*, wersja 10.0.5 [4] w celu zbadania bezpieczeństwa biernego pieszych wykonywane są jedynie testy zderzeniowe wykorzystujące tzw. *headforms*, *lower legforms* oraz *upper legforms*, czyli z ang. urządzenia modelujące pojedyncze człony ciała, odpowiednio: głowę, podudzie (wraz z kolanem) oraz udo.

Do kategorii manekinów wykorzystywanych w przemyśle i badaniach naukowych zaliczyć można:

- manekin Hybrid III Pedestrian (w wersjach analogicznych dla manekinów pasażerów: 5-centylowa kobieta, 50-centylowy mężczyzna, 95-centylowy mężczyzna)¹,
- manekin Polar, stworzony przez Hondę [1],
- manekin stworzony przez Chalmers University of Technology przy współpracy z Autoliv, m.in. w celu badania skuteczności aktywnej pokrywy silnika [6].

¹ Od manekina pasażera *Hybrid III* odróżnia go konstrukcja miednicy.



Ryc. 1. Test zderzeniowy z lower legform [14].



Ryc. 2. Manekin Hybrid III Pedestrian. Źródło: humanetics.humaneticsgroup.com.



Ryc. 3. Manekin Polar II [1].



Ryc. 4. Manekin opracowany przez Chalmers University of Technology [6].

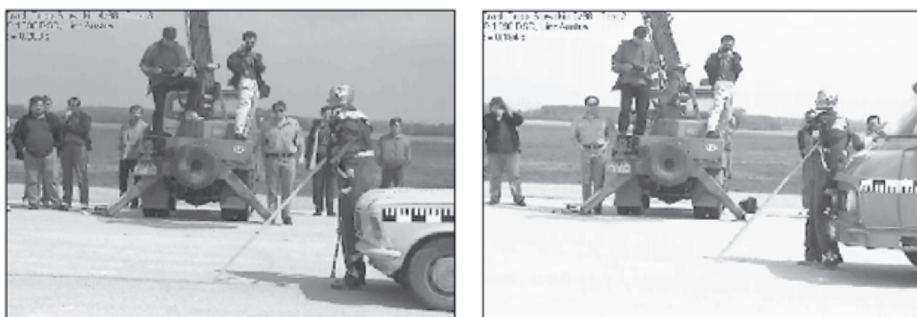
W odniesieniu do manekinów pieszych wykorzystywanych w rekonstrukcji, głównym wymaganiem jest możliwość jakościowego odtworzenia kinematyki rzeczywistego ciała w chwili uderzenia, m.in. w celu porównania lokalizacji uszkodzeń powstających na pojazdach w rzeczywistym zdarzeniu i w próbie zderzeniowej. W obszarze zainteresowań znajduje się także uzyskiwana w wyniku testów z manekinami odległość odrzutu wzdłużnego, natomiast rzadziej szczegółowo analizowana jest faza lotu. Innym kryterium jest redukcja kosztów przeprowadzenia pojedynczej próby i co za tym idzie – oczekiwana wysoka wytrzymałość manekina (brak konieczności kosztownych napraw/kalibracji). Na potrzeby rekonstrukcji stosunkowo rzadko wykorzystuje się czujniki montowane wewnątrz manekina. Analizę potrącenia wykonuje się najczęściej za pomocą analizy poklatkowej nagrań wideo dokumentujących próby.

Manekiny dotychczas stosowane w rekonstrukcji to głównie starsze konstrukcje, takie jak:

- Hybrid II – manekin opracowany przez General Motors w 1972, stosowany w lotnictwie i motoryzacji, prekursor manekina Hybrid III²,
- manekin USI Žilina Dummy (USI, słow. Ústav súdneho inžinierstva, Instytut Sądowej Inżynierii przy Uniwersytecie w Żylinie), zwany także manekinem *NAMI* [9],
- manekin ACTD-Series 2 (ang. *Automotive Crash Test Dummy*), konstrukcja opracowana w Stanach Zjednoczonych przez ARL oraz Sierra Engineering w okresie 1950–1970 r.

W niektórych eksperymentach przeprowadzonych przez badaczy-rekonstruktorów wykorzystywane były także inne, nienazwane manekiny, najprawdopodobniej stanowiące własne konstrukcje autorów badań.

Poniżej przedstawione zostaną wybrane badania z dziedziny rekonstrukcji, które wykorzystywały różne manekiny zderzeniowe osób pieszych. W ramach większości z przedstawionych poniżej badań, autorzy dokonywali porównania wyników testów zderzeniowych z wynikami symulacji z użyciem modeli wielobryłowych w programach rekonstrukcyjnych: PC-Crash [11, 12] oraz Virtual CRASH [2, 3].



Ryc. 5. Nieokreślony manekin [11, 12].



Ryc. 6. Nieokreślony manekin; najprawdopodobniej własna konstrukcja (członami ciała były worki z piaskiem oklejone taśmą klejącą) [3].

² Manekin Hybrid II znany jest też z programu popularnonaukowego „Pogromcy Mitów” (Adam Savage’s Tested, 2021).



Ryc. 7. Badania amerykańskiej policji; nieokreślony manekin wykonany z tworzywa sztucznego, masa 22 kg, wzrost 178 cm) [2].



Ryc. 8. Manekin ACTD Series 2 [13].



Ryc. 9. Manekin Hybrid II [13].



Ryc. 10. Manekin USI Žilina Dummy [8].



Ryc. 11. Budowa manekina USI Žilina Dummy [15].

3. Manekin PRIMUS

Rozwiązaniem mogącym stanowić pomost pomiędzy wymaganiami testów badawczo-rozwojowych oraz praktyką rekonstrukcji wypadków drogowych jest manekin PRIMUS niemieckiej firmy CTS.

3.1. Budowa

Manekin PRIMUS to stosunkowo nowa konstrukcja, rozwijana i badana od 2013 roku. Nazywana w wielu publikacjach *biofidelic dummy* (ang. manekin biozgodny) wyróżnia się zastosowanymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi.

Manekin swoim wzrostem i masą odpowiada 50-centyłowemu (przeciętnemu) mężczyźnie, o masie 78 kg i 175 cm (istnieje jednak także możliwość dostosowania proporcji i wymiarów do indywidualnych potrzeb użytkownika).



Ryc. 12. Rozwój konstrukcji manekina PRIMUS – od drewnianego szkieletu i uproszczonej klatki piersiowej po obecną³.

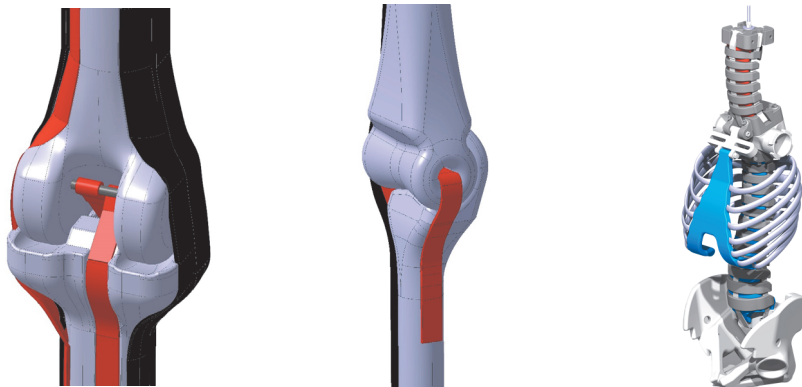
PRIMUS posiada realistycznie odwzorowany układ szkieletowy, składający się m.in. z kręgosłupa wygiętego w sposób imitujący naturalne krzywizny oraz ze sztucznych odpowiedników więzadeł i krążków międzykręgowych. W samym kręgosłupie występują 3 różne rodzaje więzadeł (realizowane przez linki stalowe, taśmy nylonowe i taśmy gumowe). Gęstość materiałów tworzących elementy takie jak: kości, krążki międzykręgowe była oparta na bazie szkieletu człowieka.

Do zamodelowania tkanki miękkiej, w manekinie wykorzystane zostały mieszkanki materiałów silikonowych o różnej twardości. W zależności od danej części ciała, zastosowane materiały odróżnią się od siebie sztywnością oraz kolorem.

³ Wszystkie ilustracje dotyczące manekina PRIMUS pochodzą z materiałów firmy CTS udostępnionych Autorowi, o ile nie podano inaczej.



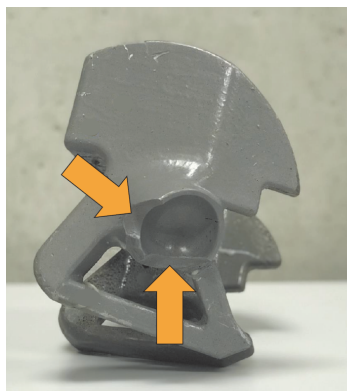
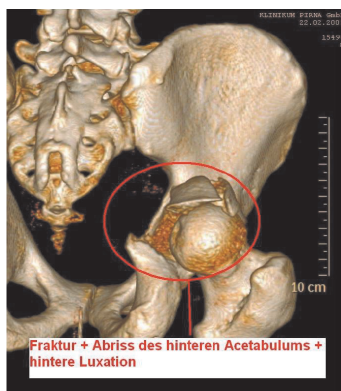
Ryc. 13. Odcinek szyjny kręgosłupa manekina PRIMUS. Źródło: zdjęcia własne CYBID.



Ryc. 14. Wybrane elementy układu szkieletowego manekina PRIMUS: a) więzadła stawu kolanowego, b) staw łokciowy, c) klatka piersiowa i kręgosłup (mostek oraz krążki międzykręgowe wykonane z innego materiału niż żebro/kręgi).

W przeciwieństwie do manekina Hybrid III, miednica manekina PRIMUS umożliwia wykorzystanie go zarówno w pozycji siedzącej, jak i stojącej, co rozszerza jego możliwości zastosowania. Ręce manekina PRIMUS są wyposażone w zdolność chwytania.

Manekin PRIMUS występuje obecnie w dwóch wersjach: *Unbreakable* i *Breakable*. Dzięki wersji *Breakable* istnieje możliwość stosowania biodegradowalnych członów, co rozszerza analizy z jego wykorzystaniem także o możliwość przeprowadzenia „sekcji” manekina i analizy obrażeń układu szkieletowego. Porównywanie obrażeń poszkodowanych w rzeczywistych wypadkach z „obrażeniami” manekina pozostaje tematem szeregu publikacji [7, 16].

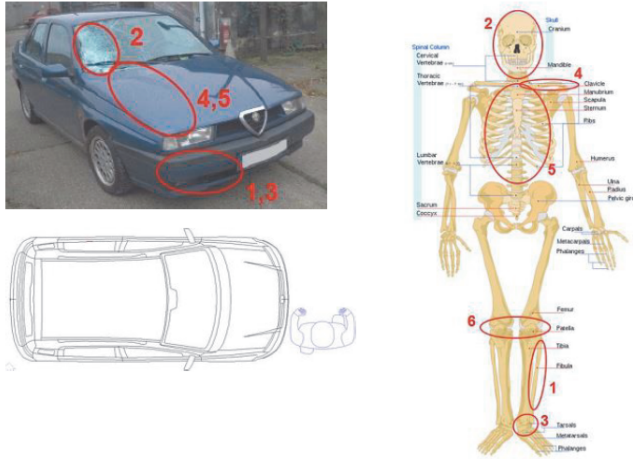


Ryc. 15. Porównanie obrazów stawu biodrowego pieszego z uszkodzeniami miednicy manekina PRIMUS przy podobnej konfiguracji potrącenia.

Manekin PRIMUS ma w swojej konstrukcji przewidziane miejsca na montaż czujników oraz pokładowego rejestratora. Sugerowaną instrumentacją dla manekina jest wyposażenie go w czujniki przyspieszenia w głowie, klatce piersiowej oraz na miednicy.

3.2. Weryfikacja

Weryfikację działania manekina wykonała firma CTS przy współpracy z DEKRA w 2019 r. [15]. Manekina PRIMUS porównano z manekinem USI Žilina Dummy m.in. pod kątem kinematyki ruchu. Sprawdzone także zgodność zachowania z rzeczywistymi wypadkami, korzystając z bazy danych zawierającej informacje o obrażeniach poszkodowanych oraz odnotowanych punktów uderzenia o nadwozie pojazdu.



vehicle data		pedestrian data	
Alfa Romeo 155 1995		67 years	
trapezium		female	
1215 kg		164 cm	
50 - 55 km/h		78 kg	
late or unbraked		survived	
frontal			
complete			
no.	injury	injury caused by hit	injury caused by ...
1	fracture of left fibula	primary	bumper
2	large occipital laceration	primary	windscreen
3	bimalleolar fracture of upper ankle joint	primary	bumper
4	fracture of left clavicle	primary	bonnet
5	multiple fractures of 3rd to 5th rib in axillary line with pneumothorax	primary	bonnet
6	haematomas on both knees	secondary	ground
injury		injury caused by hit	injury caused by ...
traumatic subarachnoid haemorrhage		primary/secondary	windscreen/ground

Ryc. 16. Przykład zbioru danych, na bazie których weryfikowano zachowanie manekina PRIMUS [15].

Każdemu z manekinów: USI Žilina Dummy oraz PRIMUS wystawiono ocenę w każdej z 6 kategorii:

- biogodność (czy manekin oddaje obrażenia, jakie odniósł rzeczywisty pieszy w wyniku potrącenia),
- realistyczne odrzuty wzdłużne,
- realistyczne uszkodzenia pojazdów (zgodność z rzeczywistymi przypadkami),
- stosowalność dla prędkości kolizyjnej od 40 do 100 km/h,
- koszt,
- wytrzymałość (czy manekin może być używany kilka razy pod rząd).

W porównaniu z manekinem USI Žilina Dummy, manekin PRIMUS wykazał się wysoką biozgodnością uszkodzeń ciała oraz realistycznym stopniem uszkodzenia pojazdu w wyniku uderzenia. Oba manekiny wykazywały dobre wyniki w kategorii odrzutów wzdłużnych oraz bardzo dobre w kategorii stosowności dla dużego zakresu prędkości kolizyjnych.

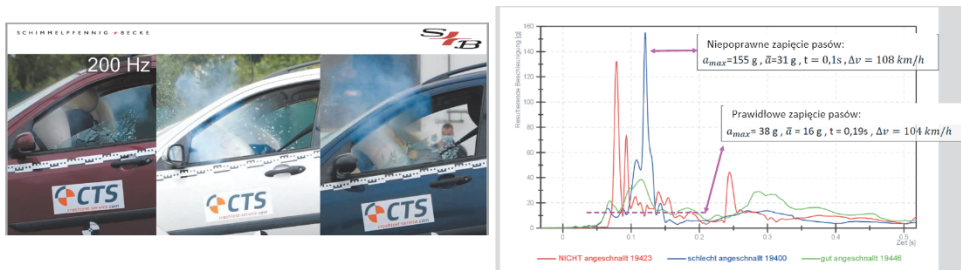
Autorzy porównania odnotowali, że wytrzymałość manekina PRIMUS była niska oraz – co za tym idzie – koszt przeprowadzenia testu z manekinem PRIMUS był większy niż z manekinem USI Žilina Dummy. Jest to zrozumiałe, zważywszy na fakt, że w porównaniu brał udział manekin PRIMUS *Breakable* wyposażony w realistycznie łamliwy szkielet.

Należy dodać, że manekin PRIMUS znajdujący się na stałym wyposażeniu firmy CYBID, potrącony w trakcie próby zderzeniowej w ramach wspomnianej na wstępie konferencji, jest egzemplarzem w wersji *Unbreakable*. Pozwala to na przeprowadzenie wielu testów bez konieczności gruntownego remontu manekina, a co za tym idzie redukcję kosztów pojedynczego testu. Należy oczywiście podkreślić, że dla wersji *Unbreakable* biozgodne uszkodzenia układu szkieletowego manekina są rzadsze. W zależności od potrzeb danego eksperymentu, istnieje jednak możliwość wymiany pojedynczych członów manekina na „łamliwe”.

3.3. Zastosowania

Manekin PRIMUS może być wykorzystany dla różnych potrzeb. Podstawowym zastosowaniem manekina są testy potrącenia niechronionych uczestników ruchu drogowego: osób pieszych, rowerzystów oraz poruszających się na środkach transportu indywidualnego (np. hulajnogi). Manekin może także pełnić funkcję pasażera/kierowcy pojazdów osobowych.

Cechą wyróżniającą manekina PRIMUS jest wspomniana wyżej możliwość zamontowania wewnątrz niego sensorów, które mogą pozwolić na badania porównujące szacowaną ciężkość obrażeń dla kilku wariantów potrącenia. W przeszłości pozwoliło to badaczom na przeprowadzenie badań porównujących obrażenia w różnych konfiguracjach zapięcia pasów: prawidłowego, nieprawidłowego lub braku zapięcia [10].



Ryc. 17. Przykład wykorzystania odczytów z czujników manekina PRIMUS: porównanie obciążeń działających na ciało kierowcy dla różnych konfiguracji zapięcia pasów [10].

Manekin PRIMUS może być wykorzystywany także na potrzeby przemysłu m.in. do testowania upręży zabezpieczających oraz na potrzeby sektora zbrojeniowego. Jako przykład można podać tutaj eksperymenty Beschussamt Ulm z 2021 r., z manekinem PRIMUS jako pasażerem. Badania miały na celu sprawdzenie wytrzymałości testowanych pojazdów opancerzonych na ogień i wybuchy poprzez sprawdzenie uszkodzeń manekina oraz obecności odłamków na jego ciele⁴. Innym przykładem o podobnej tematyce były badania z wyposażonym w sensory manekinem PRIMUS na potrzeby amerykańskich Sił Zbrojnych [5].

Mniej standardowym zastosowaniem manekina PRIMUS jest modelowanie wypadków w pracy, upadków z wysokości czy upadków do basenu.

4. Podsumowanie

Na przestrzeni lat wykorzystywano wiele manekinów symulujących osoby piesze. W zależności od potrzeb danego eksperymentu, manekiny wykazywały się różnym stopniem skomplikowania zastosowanych rozwiązań.

Manekin PRIMUS stanowi alternatywę dla starszych konstrukcji manekinów, łącząc w sobie dwa aspekty: zaawansowane rozwiązania konstrukcyjne typowe dla manekinów wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym oraz możliwość przeprowadzenia relatywnie niskim kosztem powtarzalnych testów zderzeniowych.

Przeprowadzona w Polsce pierwsza próba badawcza z manekinem PRIMUS potwierdziła możliwość prowadzenia tego rodzaju prób zderzeniowych, co otwiera nowe perspektywy badawcze w obszarze badań i rekonstrukcji zdarzeń.

Bibliografia

- [1] Anderson, R. W. G., Streeter, L. D., Ponte, G., McLean, A. J. (2007). Pedestrian reconstruction using multibody MADYMO simulation and the Polar-II dummy: a comparison of head kinematics. *Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Lyon, France, 18–21.
- [2] Becker, T., Reade, M., Scurlock, B. (2015). Simulations of Pedestrian Impact Collisions with Virtual CRASH 3 and Comparisons with IPTM Staged Tests. *Accident Reconstruction Journal*, 26 (2). Pobrano z: <http://arxiv.org/abs/1512.00790> (dostęp: 25 maja 2022 r.).
- [3] Bodolo, I., Nenad, M., Bodolo, T., Dejan, H. (2009). *Drugi eksperiment realnog sudara drumskih vozila u R Srbiji*. Pobrano z: https://www.vestacjenja.co.rs/docs/sudar_r4_bicikl.pdf (dostęp: 25 maja 2022 r.).
- [4] EuroNCAP. (2021). *Assessment Protocol – Vulnerable Road User Protection. Version 10.0.5*.

⁴ <https://www.welt.de/wirtschaft/webwelt/article236020958/Biofidel-Dummys-Crashtests-werden-zunehmend-realistischer.html>.

- [5] Foster, C. D. (2022). *Report on Generic Hull Live-Fire Test with PRIMUS Dummy*. Pobrano z: https://www.crashtest-service.com/download-file?file_id=2128&file_code=42de3e4d85 (dostęp 15 maja 2022 r.).
- [6] Fredriksson, R., Håland, Y., Yang, J. (2001). Evaluation of a new pedestrian head injury protection system with a sensor in the bumper and lifting of the bonnet's rear part. *Proceedings of the 17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*.
- [7] Hartwig, S., Knappe, M., Kunze, A., Weyde, M. (2017). Interdisciplinary further development of an optimised anthropomorphic pedestrian surrogate for full-scale crash tests. *Proceedings 26th EVU-Congress*, Haarlem, Netherlands.
- [8] Kasanický, G., Kohut, P. (2009). New Partial Overlap Pedestrian Impact Tests. *Proceedings 18th EVU Congress*, Hinckley, UK.
- [9] Kortmann, A. (2019). The New Biofidelic Dummy In Different Scenarios Of Accidents Involving Passenger Cars And Pedestrians. *Collision Magazine*, 13 (2).
- [10] Kortmann, A. (2020). Comparison of occupant load in a frontal collision with different degrees of belt usage. 9. *Sachverständigenseminar*.
- [11] Moser, A., Steffan, H., Kasanický, G. (1999). The pedestrian model in PC-Crash – The introduction of a multi body system and its validation. *SAE Technical Papers*, 794–802. DOI: 10.4271/1999-01-0445.
- [12] Moser, A., Hoschopf, H., Steffan, H., Kasanický, G. (2000). Validation of the PC-Crash Pedestrian Model. *SAE Technical Papers*, 1316–1339. DOI: 10.4271/2000-01-0847.
- [13] Moser, A., Steffan, H., Strzeletz, R. (2009). Movement of the Human Body versus Dummy after the Collision. *Proceedings 18th EVU Congress*, Hinckley, UK.
- [14] Notsu, M., Nishimoto, T., Konosu, A., Ishikawa, H. (2005). J-MLIT Research onto a Pedestrian Lower Extremity Protection-Evaluation Tests for Pedestrian Legform Impactors. *Proceedings: International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Washington.
- [15] Schäuble, A. (2019). *Crash test dummies – how realistic are currently used dummies?* Master Thesis. TU Wien.
- [16] Schäuble, A., Hartwig, S., Weyde, M. (2021). Der Biofidel-Dummy als Fahrradfahrer-Surrogat: Vorläufige Ergebnisse zur Korrelation zwischen Dummybeschädigungen und Verletzungen von Radfahrern. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, 12.
- [17] UN ECE. (2018). *Regulation no. 127/02 (Rev. 2) – Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to their pedestrian safety performance*.

* * *

Crash tests employing pedestrian dummies. PRIMUS dummy – design and unique properties

Abstract

The article presents various models of pedestrian crash test dummies, grouping them by their applicability: vehicle manufacture or road accident reconstruction. Selected experiments in the latter area using dummies of pedestrians are presented. The second part of the article is devoted to a description of a PRIMUS dummy – a relatively new product on the market. The structure of the dummy is presented, and studies verifying the dynamic response of the dummy in a collision with pedestrian are summarized. The application of the dummy in road accident reconstruction and R&D experiments are presented.

Key words

Crash tests, biomechanics, crash test dummies, PRIMUS, pedestrians, passengers.