

Article citation info:

Nycz D B. Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych nakładki kompozytowo-pianowej na przebieg testu zderzeniowego TB11 drogowej bariery ochronnej w łuku poziomym wklęsłym. The Archives of automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2017; 76(5): <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL76.ART5>

Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych nakładki kompozytowo-pianowej na przebieg testu zderzeniowego TB11 drogowej bariery ochronnej w łuku poziomym wklęsłym

Daniel B. Nycz¹

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Jana Grodka w Sanoku

Streszczenie

W pracy przedstawiono badania numeryczne wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych nakładki kompozytowo-pianowej CFR2 (opisanej w poprzednich publikacjach autora) na przebieg wirtualnego testu zderzeniowego TB11. Testy zderzeniowe obejmują zmodyfikowaną barierę SP-05/2 klasy N2-W4-A, tj. w łuku poziomym wklęsłym o promieniu 150 m. Test TB11 dotyczy samochodu osobowego o masie 900 kg, uderzającego w barierę z prędkością 100 km/h pod kątem 20°. Nakładka CFR2 składa się z segmentów kompozytowych poliestrowo-szklanych, częściowo wypełnionych pianką poliuretanową. Przekrój poprzeczny nakładki jest dopasowany do prowadnicy typu B. Obliczenia numeryczne przeprowadzono w środowisku LS-Dyna z wykorzystaniem modelu pojazdu Geo Metro, pobranego ze strony NCAC i poddanego niezbędnym modyfikacjom. Wyniki wirtualnych testów zderzeniowych przeanalizowano pod kątem wszystkich parametrów jakościowych i ilościowych wymaganych przez normy PN-EN 1317-1:2010 i PN-EN 1317-2:2010. Przeprowadzone analizy wykazały, że konstrukcja nakładki CFR2 jest trafna i wystarczająca do zapewnienia przyjęcia badania zderzeniowego TB11.

Słowa kluczowe: wirtualny test zderzeniowy TB11, bariera w łuku poziomym wklęsłym, nakładka kompozytowo-pianowa, parametry konstrukcyjne nakładki

Keywords: TB11 virtual crash test, barrier in horizontal concave arc, composite-foam overlay, overlay design parameters

¹ Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Jana Grodka w Sanoku, Instytut Techniczny, ul. Reymonta 6, 38-500 Sanok; e-mail: daniel.nycz@interia.pl
Jan Grodek State Vocational Academy in Sanok, Technical Institute, ul. Reymonta 6, 38-500 Sanok; e-mail: daniel.nycz@interia.pl

1. Wprowadzenie

Wirtualne testy zderzeniowe są przedmiotem szeregu publikacji. Analizowane są różne systemy powstrzymywania, m.in. stalowe [1, 6, 7, 9, 13, 18÷21] oraz betonowe [3÷5, 10] bariery ochronne. Modele pojazdów są pobierane strony National Crash Analysis Center (NCAC), USA [27].

W przypadku stalowych barier ochronnych, analizie poddaje się głównie bariery prostoliniowe o różnych poziomach powstrzymywania [6, 7, 15, 21], zgodnie z obowiązującymi normami [23, 24]. W pracy [15] rozpatruje się wybraną skrajną barierę drogową klasy N2-W4-A, z prowadnicą typu B, w łuku poziomym wklęsłym, usytuowaną na łuku poziomym drogi głównej ruchu przyspieszonego, o promieniu dopuszczalnym w osi drogi 140–220 m. Wykazano, że badanie zderzeniowe TB11 nie może być przyjęte dla bariery w tej konfiguracji. W celu zapewnienia przyjęcia badania TB11, zaprojektowano nakładkę kompozytowo-pianową o kodzie CFR2, którą połączono z prowadnicą B za pomocą złączy śrubowych, z wykorzystaniem tylko wolnych otworów w osi prowadnicy, występujących co 2.00 m. Opracowano metodykę modelowania numerycznego i symulacji niezmodyfikowanego (bariera prostoliniowa) i zmodyfikowanego (bariera zakrzywiona) testu zderzeniowego TB11, bez nakładki oraz z nakładką CFR2. Przeprowadzono wirtualne testy zderzeniowe TB11 w odniesieniu do czterech ww. układów konstrukcyjnych bariery. Model pojazdu Geo Metro, odpowiednio poprawiony, zaczerpnięto z biblioteki publicznej National Crash Analysis Center, USA [27]. Do symulacji testów zderzeniowych zastosowano system LS-Dyna v971. Wykazano, że bariera z nakładką w łuku poziomym wklęsłym zapewnia przyjęcie badania zderzeniowego TB11.

Wyniki symulacji testów zderzeniowych lekkiego pojazdu z barierą w łuku poziomym o promieniu ~12 m i prowadnicą typu W, przedstawiono w pracy [18]. Model pojazdu zaczerpnięto z biblioteki NCAC [27]. Prędkość zderzenia wynosiła 40, 60 i 80 km/h. We wszystkich przypadkach samochód uderzał w barierę prawie pod kątem 0° i ślizgał się po niej, nie doznając większych uszkodzeń. W efekcie następowało poprawne wyprowadzenie pojazdu z interakcji z barierą. Celem badań było porównanie indeksu intensywności przyspieszenia ASI. Analizę wpływu uderzenia pojazdu Geo Metro w betonową barierę ochronną w łuku poziomym o promieniu 50, 100 i 200 m oraz kierunku ruchu, z którego nadjeżdża pojazd, przeprowadzono w pracy [3].

Modyfikacje bariery drogowej o poziomie powstrzymywania H1 na podstawie wirtualnych testów zderzeniowych TB11 i TB42, przedstawiono w pracach [6, 7]. Autorzy badali wpływ czterech zmian konstrukcyjnych: 1) wprowadzenie pasa rozciąganego, 2) wprowadzenie prowadzenia rolkowego, 3) wprowadzenie liny w górnej części prowadnicy, 4) wprowadzenie liny w dolnej części prowadnicy.

2. Badany system oraz testy zderzeniowe objęte analizą

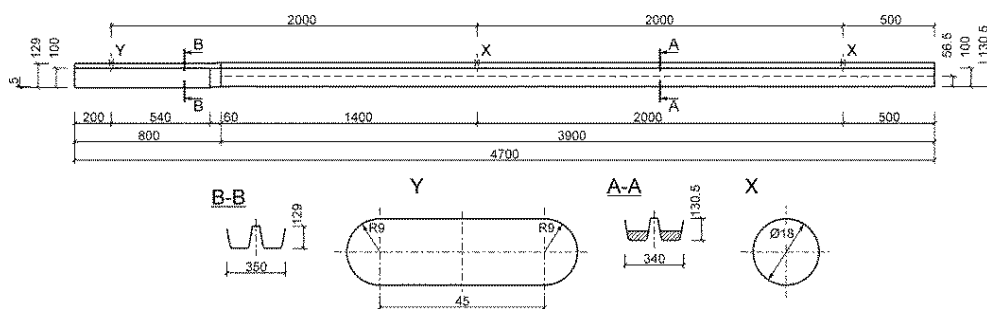
W pracy rozpatruje się barierę drogową SP-05/2 klasy N2-W4-A, której producentem jest firma Stalprodukt S.A, z siedzibą w Bochni [26]. System może być stosowany zarówno na krawędzi zewnętrznej jezdni, jaki i na pasach rozdziału (dwie równoległe bariery). Bariera składa się z odcinków prowadnicy typu B o długości całkowitej 4.30 m (długość efektywna 4.00 m), słupków Sigma o długości 1.9 m oraz wsporników trapezowych i podkładek prostokątnych. Wszystkie elementy bariery wykonane są ze stali konstrukcyjnej S235JR.

Poszczególne elementy systemu poddano procesowi cynkowania ogniowego. Jako łączniki zastosowano śruby M16 klasy 4.6 [25, 26].

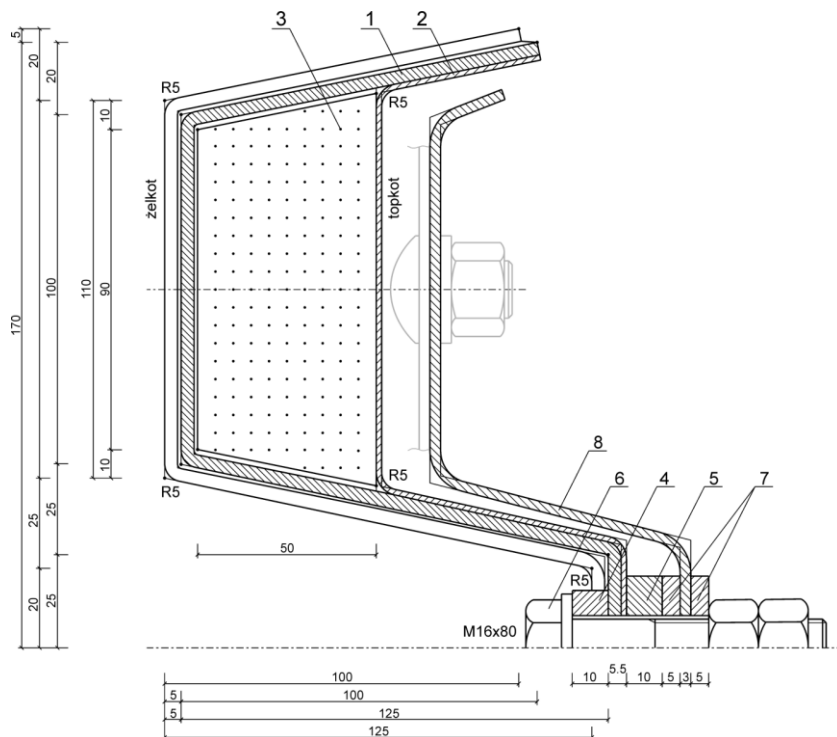
Normy PN-EN 1317 [23, 24] określają warunki przyjęcia systemu powstrzymywania klasy N2, poprzez testy zderzeniowe TB11 i TB32 (TB11: samochód osobowy o masie 900 kg i prędkości 100 km/h, kąt zderzenia 20°; TB32: samochód osobowy o masie 1500 kg i prędkości 110 km/h, kąt zderzenia 20°). Testy zderzeniowe zatwierdzające system powstrzymywania wykonywane są na prostoliniowych odcinkach bariery. W pracach [15, 17, 20], na podstawie wirtualnych testów zderzeniowych TB11 i TB32 wykazano, że system SP-05/2 w łuku poziomym wklęsłym o promieniu 150 m nie spełnia kryteriów przyjęcia bariery zgodnie z normami [23, 24]. Promień 150 m jest najmniejszym promieniem krzywizny bariery zewnętrznej na łukach dróg GP. W celu spełnienia kryteriów przyjęcia testów zderzeniowych na łukach dróg przez system SP-05/2, zaprojektowano nakładkę kompozytowo-pianową CFR2 [15, 16, 20].

Nakładka CFR2 składa się z segmentów kompozytowych poliestrowo-szkłanych, częściowo wypełnionych pianką poliuretanową (rys. 1, 2, [15]). Całkowita długość segmentu nakładki wynosi 4.70 m, przy długości efektywnej 4.00 m (rys. 1, 3, [15]). Przekrój poprzeczny nakładki CFR2 został dopasowany do prowadnicy typu B bariery drogowej. Powłoki kompozytowe są wytworzone z następujących komponentów: 1) żywica Polimal P-104TS (matryca; producent Organika-Sarzyna, Sarzyna); 2) mata szklana E, typ EM450 (wzmocnienie; producent Krosglass, Krosno); 3) tkanina szklana E, typ STR600 (wzmocnienie; producent Krosglass, Krosno); 4) żelkot i topkot izoftalowy uniepalniony w kolorze RAL7035 (warstwy ochronne). Sekwencja warstw powłoki kompozytowej przedniej o grubości 4 mm, jest następująca: żelkot, mata szklana EM450, dwie warstwy tkaniny szklanej STR600. Sekwencja warstw powłoki kompozytowej tylnej o grubości 1.5 mm, jest następująca: mata szklana EM450, topkot. Do wypełnienia kanałów trapezowych powłok kompozytowych zastosowano piankę poliuretanową PUR S-42 o gęstości 42 kg/m³. Wypełnienie jest na długości 3.90 m.

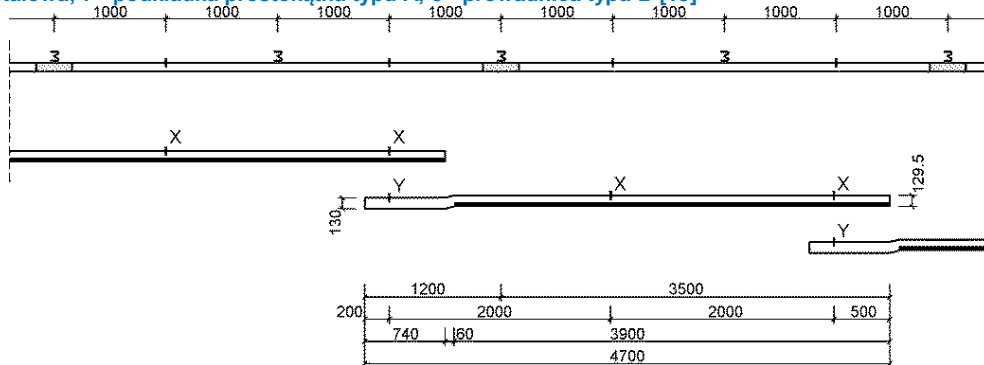
Mocowanie nakładki CFR2 do prowadnicy typu B odbywa się za pomocą śrub M16x80 klasy 8.8 oraz prostokątnych podkładek z gumy EPDM 70°ShA i podkładek stalowych prostokątnych typu A według katalogu firmy Stalprodukt. Wykorzystywane są wolne otwory prowadnicy typu B systemu SP-05/2 (rys. 3). Pełny opis nakładki CFR2, znaleźć można w pracach [15, 16, 20].



Rys. 1. Segment nakładki CFR2 [15]



Rys. 2. Przekrój poprzeczny nakładki CFR2 w osi węzła X: 1 - laminat przedni; 2 - laminat tylny; 3 - pianka poliuretanowa; 4 - podkładka gumowa przednia; 5 - podkładka gumowa tylna; 6 - śruba stalowa; 7 - podkładka prostokątna typu A; 8 - prowadnica typu B [15]



Rys. 3. Schemat montażu nakładki CFR2 na prowadnicy typu B systemu SP-05/2 [15]

3. Modele numeryczne analizowanych układów

W analizowanych zmodyfikowanych wirtualnych testach zderzeniowych TB11 (bariera w łuku poziomym wklęsłym o promieniu 150 m) wykorzystano model pojazdu Geo Metro, opracowany przez NCAC [27]. Zawiera on ponad 33 tys. elementów skończonych. Wstępne wirtualne testy zderzeniowe (m.in. uderzenie centralne i pod kątem 20° pojazdu w sztywną

ścianę) wykazały konieczność wprowadzenia szeregu modyfikacji i uzupełnień do tego modelu, m.in. zmiana modelu opisującego pracę opon, korekta modelu zawieszenia, wprowadzenie dynamicznej relaksacji (grawitacja) przed rozpoczęciem procesu zderzenia pojazdu z barierą, korekta opcji modeli kontaktu oraz kart kontrolnych [15].

Odcinek badawczy bariery SP-05/2 w łuku o promieniu 150 m, o długości 60 m, posiatkowano 4-węzłowymi powłokowymi elementami skończonymi o sformułowaniu Belytschko–Tsay, z całkowaniem zredukowanym w płaszczyźnie elementu (sformułowanie ELFORM_2 według [11, 12]). Stalowe słupki SIGMA bariery SP-05/2 posadowione w gruncie odwzorowano przez walce o promieniu 1.00 m i wysokości 1.30 m, posiatkowane elementami bryłowymi o topologii HEX8 oraz PENTA6, z przypisanym sformułowaniem ELFORM_1 (elementy bryłowe ze stałym całowaniem) [11, 12]. Elementy kompozytowe nakładki CFR2 posiatkowano tymi samymi elementami skończonymi co elementy stalowe bariery SP-05/2 (topologia QUAD4, sformułowanie ELFORM_2), deklarując po jednym punkcie całkowania na warstwę laminatu [11, 12]. Piankę poliuretanową opisano 8-węzłowymi elementami bryłowymi ze sformulowaniem ELFORM_1.

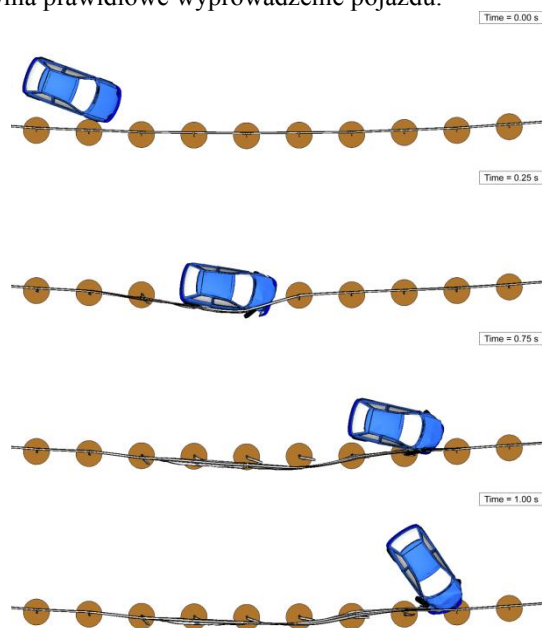
Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na funkcjonalność barier ochronnych są łączniki śrubowe. Istotne jest prawidłowe odwzorowanie ich sztywności oraz zniszczenia. Połączenia śrubowe segmentów prowadnic opisano za pomocą elementów belkowych z przypisanymi parametrami sztywnościowymi (model materiałowy *MAT_68_NONLINEAR_PLASTIC_DISSCRETE_BEAM [11, 12]). Parametry te uzyskano z modelowania 3D złączy śrubowych [14, 20]. Połączenia śrubowe nakładki CFR2 z systemem SP-05/2 oraz słupków SIGMA z prowadnicami typu B modelowano za pomocą *CONSTRAINED_GENERALIZED_WELD_SPOT [11, 12], z odpowiednimi nośnościami wynikającymi z klasy wytrzymałości śrub [2].

W zmodyfikowanym systemie SP-05/2 występuje kilka rodzajów materiałów, które opisano różnymi modelami materiałowymi dostępnymi w systemie LS-Dyna [11, 12]. Elementy wykonane ze stali konstrukcyjnej S235JR (system SP-05/2) opisano modelem sprężysto-plastycznym z umocnieniem izotropowym, uwzględniającym kryterium niszczenia bazujące na efektywnych odkształceniach plastycznych: *MAT_024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Stałe materiałowe zaczerpnięto z certyfikatu jakości produktu firmy Stalprodukt. Powłoki kompozytowe poliestrowo-szklane nakładki CFR2 opisano modelem materiałowym liniowo-sprężysto-kruchym uwzględniającym kryterium niszczenia Chang–Chang: *MAT_054_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE. Model ten wykorzystuje się głównie do opisu kompozytów wzmocnionych jednokierunkowo oraz tkaninami, jak wykazano w pracy [22]. Stałe sprężystości i wytrzymałości lamin materiału kompozytowego nakładki wyznaczono z badań eksperymentalnych identyfikacyjnych przeprowadzonych w Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji Katedry Mechaniki i Informatyki Stosowanej Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej [20]. Model materiałowy *MAT_026_HONEYCOMB zastosowano do opisu pianki poliuretanowej. Stałe materiałowe pianki poliuretanowej PUR S-42 zaczerpnięto z pracy [8]. Grunt, w którym posadowione są słupki SIGMA systemu SP-05/2, opisano modelem materiałowym *MAT_005_SOIL_AND_FOAM. Jest to prosty model stosowany do opisu zachowania pian i gruntów w przypadku, w którym ich stałe materiałowe nie są w pełni określone. Stałe materiałowe gruntu zaczerpnięto ze strony NCAC [27]. Szczegóły modelowania badanych układów podano w pracach [15, 20].

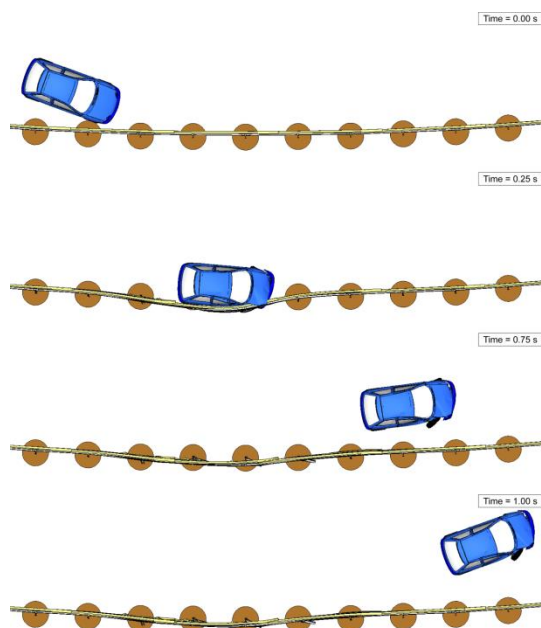
4. Zmodyfikowane bazowe wirtualne testy zderzeniowe TB11 systemu SP-05/2

Zgodnie z katalogiem firmy Stalprodukt S.A. [26], system SP-05/2 klasy N2-W4-A spełnia wymagania norm [23, 24] dla prostoliniowego odcinka bariery. Wirtualne testy zderzeniowe TB11 i TB32 systemu SP-05/2, przedstawione w pracach [15, 17, 20], wykazały zgodność z wynikami eksperymentalnych testów zderzeniowych przedstawionymi w [26].

Wirtualny test zderzeniowy TB11 dla bariery w łuku poziomym wklęsłym o promieniu 150 m bez nakładki (kod TB11/CB/20) i z nakładką CFR2 (kod TB11/CBC/20), nazwano bazowymi wirtualnymi testami zderzeniowymi. Wyniki symulacji bazowych testów zderzeniowych przedstawiono na rys. 4 i 5. Dla testu TB11/CB/20 następuje niedopuszczalne przez normy [23, 24] zarzucenie pojazdu, co nie zapewnia przyjęcia badania zderzeniowego bariery SP-05/2 w łuku o promieniu 150 m. Wprowadzenie nakładki CFR2 do analizowanego układu (rys. 5), zapewnia prawidłowe wyprowadzenie pojazdu.



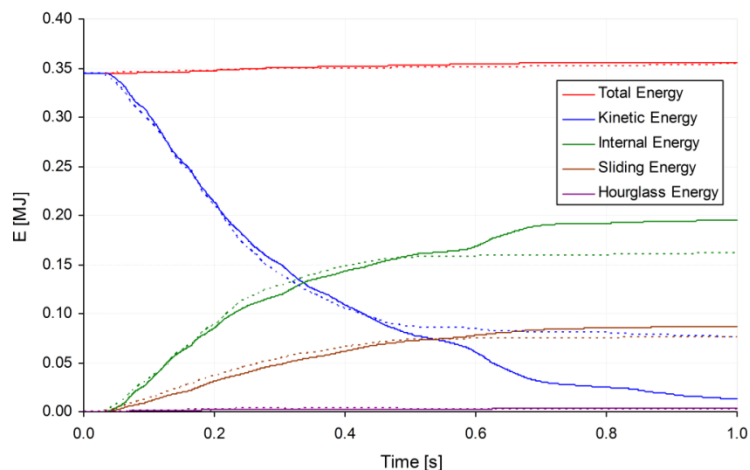
Rys. 4. Animacja testu zderzeniowego TB11/CB/20 – widok z góry [15]



Rys. 5. Animacja testu zderzeniowego TB11/CBC/20 – widok z góry [15]

Na rys. 6 przedstawiono porównanie bilansów energetycznych powyższych testów. Dla testu TB11/CB/20, w wyniku kolizji pochłonięciu ulega 95% energii kinetycznej pojazdu, a energia pochłonięta w wyniku niszczenia materiałów wynosi 0.195 MJ. Dla testu TB11/CBC/20, w wyniku kolizji pochłonięciu ulega 79% energii kinetycznej pojazdu, a energia pochłonięta w wyniku niszczenia materiałów wynosi 0.161 MJ. Prędkość residualna pojazdu w momencie zakończenia interakcji pojazdu z barierą wynosi 47.5 km/h.

Wyniki bazowych wirtualnych testów zderzeniowych TB11/CB/20 i TB11/CBC/20 zestawiono w tabeli 2. Wpływ nakładki CFR2 na przebieg testu zderzeniowego TB11 dla bariery w łuku jest znaczny – głównie ze względu na prawidłowe wyprowadzenie pojazdu przez system SP-05/2 z nakładką CFR2. W przypadku testu TB11/CBC/20, w porównaniu do testu TB11/CB/20, następuje zmniejszenie ASI o 5.9%, THIV o 8.1%, szerokości pracującej o 15.3% i długości interakcji pojazdu z barierą o 47.2%.



Rys. 6. Porównanie bilansów energetycznych dla testów TB11/CB/20 (linie ciągłe) i TB11/CBC/20 (linie przerywane)

5. Analizowane parametry konstrukcyjne nakładki CFR2

Aby wykazać, że konstrukcja nakładki CFR2 jest poprawna i wystarczająca do przyjęcia zmodyfikowanych wirtualnych testów zderzeniowych TB11 w łuku poziomym wklęsłym o promieniu 150 m, przeprowadzono badania numeryczne wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych nakładki. W tabeli 1 zestawiono testy objęte analizą numeryczną.

6. Wpływ rdzenia piankowego i laminatu tylnego

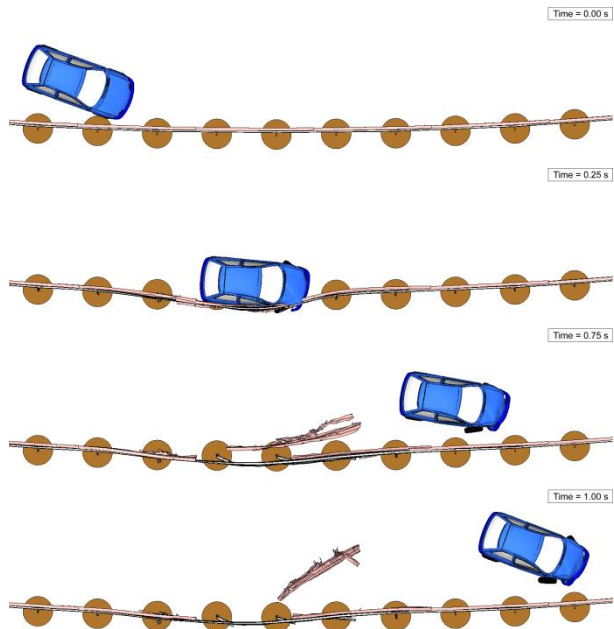
Wyniki symulacji testu zderzeniowego TB11/CBC/20_NF przedstawiono na rys. 7. W trakcie kolizji występuje zniszczenie jednego segmentu nakładki i oderwanie go od prowadnicy (zniszczenie złączy śrubowych). Uszkodzenia oraz deformacja pojazdu dotyczy tylko przedniego zestawu kołowego. Następuje zarzucenie pojazdu w normowym polu odbicia, co jest niegodne z normami [23, 24].

Tabela 1. Testy objęte analizą numeryczną wpływu wybranych parametrów

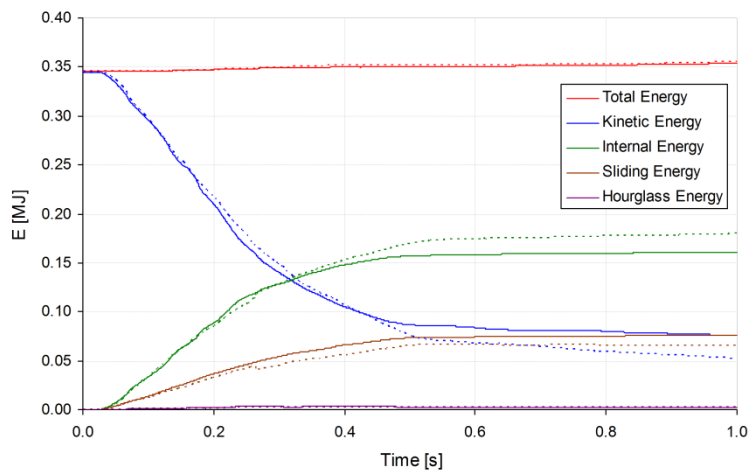
Kod układu/testu	Opis modyfikacji układu	Cel badań numerycznych
TB11/CBC/20_NF	brak rdzenia piankowego i laminatu tylnego	wpływ rdzenia piankowego i laminatu tylnego
TB11/CBC/20_45	konfiguracja tkanin $\pm 45^\circ$ laminatu przedniego	wpływ sekwencji warstw laminatu przedniego
TB11/CBC/20_1 TB11/CBC/20_2	dodanie jednej lub dwóch warstw wzmocnionych tkaniną (konfiguracja [0/90]) do laminatu przedniego	wpływ grubości laminatu przedniego

Na rys. 8 przedstawiono porównanie bilansów energetycznych testów TB11/CBC/20 i TB11/CBC/20_NF. Dla testu TB11/CBC/20_NF w wyniku kolizji pochłonięciu ulega 84.9% energii kinetycznej pojazdu, a energia pochłonięta w wyniku niszczenia materiałów wynosi

0.180 MJ. Prędkość residualna pojazdu w momencie zakończenia interakcji pojazdu z barierą wynosi 43.6 km/h. W tabeli 2 zestawiono wyniki przeprowadzonego wirtualnego testu zderzeniowego TB11/CBC/20_NF. Rdzeń piankowy i laminat tylny nakładki CFR2 mają zasadniczy wpływ na przebieg wirtualnego testu zderzeniowego TB11 w odniesieniu do bariery w łuku. Elementy te zapewniają przyjęcie badania zderzeniowego TB11.



Rys. 7. Animacja testu zderzeniowego TB11/CBC/20_NF – widok z góry



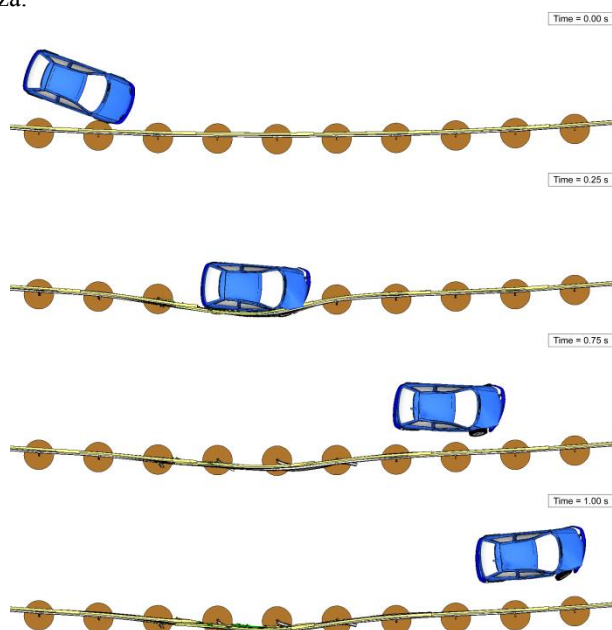
Rys. 8. Porównanie bilansów energetycznych dla testów TB11/CBC/20 (linie ciągłe) i TB11/CBC/20_NF (linie przerywane)

7. Wpływ sekwencji warstw laminatu przedniego

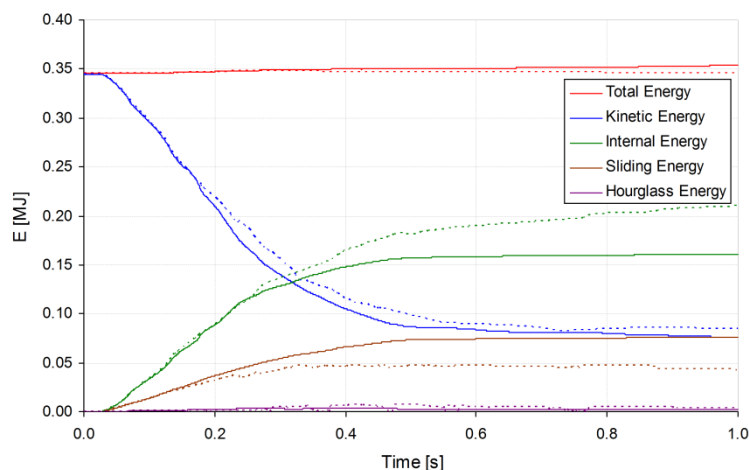
Wyniki symulacji testu zderzeniowego TB11/CBC/20_45 przedstawiono na rys. 9. Trajektoria ruchu pojazdu jest poprawna. Na rys. 10 przedstawiono porównanie bilansów energetycznych testów TB11/CBC/20 i TB11/CBC/20_45. Dla testu TB11/CBC/20_45 w wyniku kolizji pochłonięciu ulega 75.6% energii kinetycznej pojazdu, a energia pochłonięta w wyniku niszczenia materiałów wynosi 0.211 MJ. Prędkość residualna pojazdu w momencie zakończenia interakcji z barierą wynosi 55.3 km/h.

W tabeli 2 zestawiono wyniki przeprowadzonego wirtualnego testu zderzeniowego TB11/CBC/20_45. W przypadku testu TB11/CBC/20_45, w porównaniu do testu TB11_CBC_20, następuje zmniejszenie ASI o 7.5%, THIV o 12.6%, szerokości pracującej o 1.4% i długości interakcji pojazdu z barierą o 16.2%. Prędkość residualna pojazdu w chwili zakończenia interakcji pojazd – bariera jest większa o 16.4%.

Zmiana sekwencji ułożenia warstw tkaniny z [0/90] na [45/-45] w nakładce CFR2 wpływa na poprawę większości parametrów zderzenia. Pojazd w normowym polu odbicia jest jednak bliski zarzuceniu. Ponadto, nakładka CFR2 z sekwencją warstw tkaniny laminatu przedniego [45/-45] jest droższa.



Rys. 9. Animacja testu zderzeniowego TB11/CB/20_45 – widok z góry



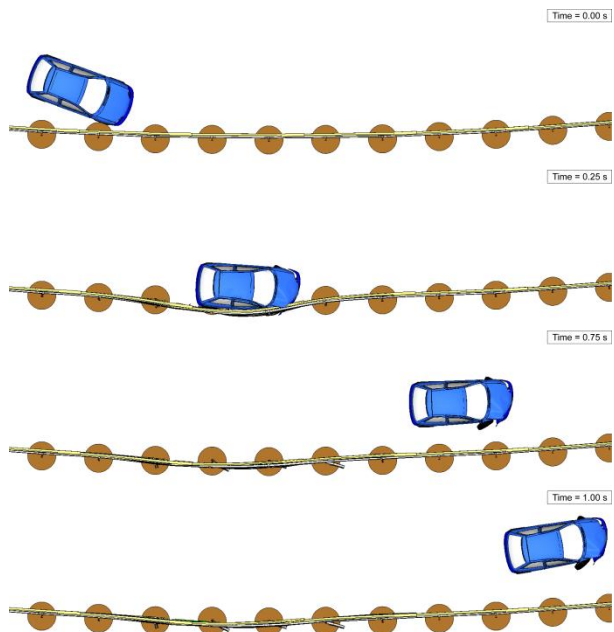
Rys. 10. Porównanie bilansów energetycznych dla testów TB11/CBC/20 (linie ciągłe) i TB11/CBC/20_45 (linie przerywane)

8. Wpływ grubości laminatu przedniego

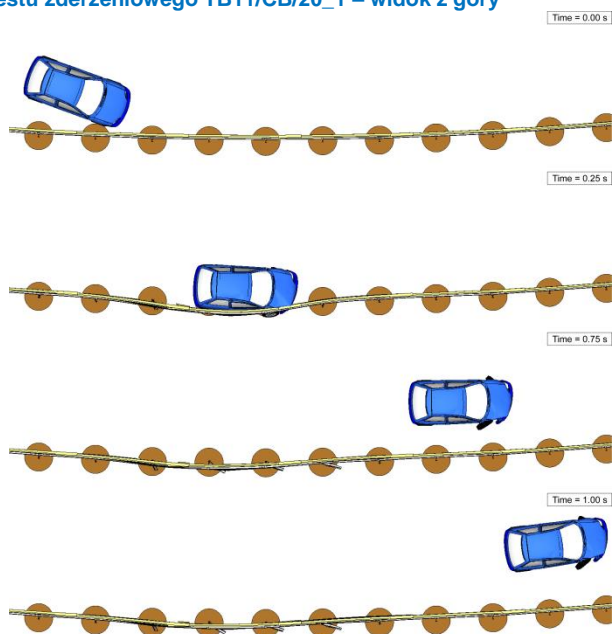
Wyniki symulacji testów zderzeniowych TB11/CBC/20_1 i TB11/CBC/20_2 przedstawiono na rys. 11 i 12. Na rys. 13 przedstawiono porównanie bilansów energetycznych testów TB11/CBC/20, TB11/CBC/20_1 i TB11/CBC/20_2. Dla testu TB11/CBC/20_1, w wyniku kolizji pochłonięciu ulega 65.9% energii kinetycznej pojazdu, a energia pochłonięta w wyniku niszczenia materiałów wynosi 0.165 MJ. Prędkość residualna pojazdu w momencie zakończenia interakcji pojazdu z barierą wynosi 61.0 km/h. Uszkodzenia pojazdu Geo Metro są nieznaczne. Dla testu TB11/CBC/20_2, w wyniku kolizji pochłonięciu ulega 74.2% energii kinetycznej pojazdu, a energia pochłonięta w wyniku niszczenia materiałów wynosi 0.143 MJ. Prędkość residualna pojazdu w momencie zakończenia interakcji pojazdu z barierą wynosi 57.3 km/h. Uszkodzenia pojazdu Geo Metro są nieznaczne.

W tabeli 2 zestawiono wyniki przeprowadzonych wirtualnych testów zderzeniowych TB11/CBC/20_1 i TB11/CBC/20_2. W przypadku testu TB11/CBC/20_1 w odniesieniu do testu TB11/CBC/20 następuje zmniejszenie THIV o 11.7%, szerokości pracującej o 5.6% i długości interakcji pojazdu z barierą o 15.4%. Prędkość residualna pojazdu w chwili zakończenia interakcji pojazd – bariera jest większa o 28.4%. Wartość parametru ASI jest taka sama. W przypadku testu TB11/CBC/20_2 w odniesieniu do testu TB11/CBC/20 następuje zmniejszenie ASI o 8.8%, THIV o 10.8%, szerokości pracującej o 8.3% i długości interakcji pojazdu z barierą o 15.4%. Prędkość residualna pojazdu w chwili zakończenia interakcji pojazd – bariera jest większa o 20.6%.

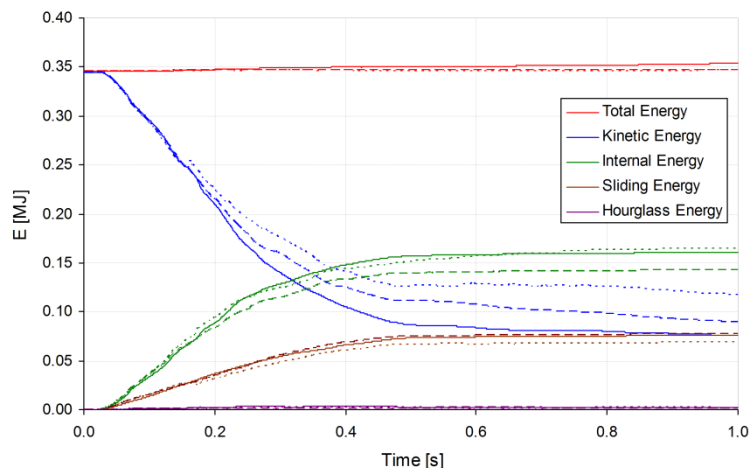
Dodanie jednej warstwy tkaniny [0/90] w laminacie przednim nakładki CFR2 wpływa na poprawę niektórych parametrów zderzenia (m.in. THIV, W, v_r). Jednak nakładka bez dodatkowej warstwy, a więc tańsza, jest wystarczająca do uzyskania bardzo dobrych parametrów zderzenia i przyjęcia badania zderzeniowego TB11. Dodanie kolejnej warstwy tkaniny [0/90] (łącznie dwie dodatkowe warstwy) nie poprawia w istotny sposób parametrów zderzenia.



Rys. 11. Animacja testu zderzeniowego TB11/CB/20_1 – widok z góry



Rys. 12. Animacja testu zderzeniowego TB11/CB/20_2 – widok z góry



Rys. 13. Porównanie bilansów energetycznych dla testów TB11/CBC/20 (linie ciągłe), TB11/CBC/20_1 (linie przerywane gęste) i TB11/CBC/20_2 (linie przerywane rzadkie)

Tabela 2. Porównanie wyników wirtualnych testów zderzeniowych

Układ dynamiczny	ASI	THIV [km/h]	VCDI	W [m]	L^1 [m]	PPO ²⁾	E^3 [MJ]	v_r^4 [km/h]
TB11/CB/20	0.85	20.91	RF0010000	0.85	12.3	nie	0.195	-
TB11/CBC/20	0.80	19.21	RF0010110	0.72	6.50	tak	0.161	47.5
TB11/CBC/20_NF	1.01	16.12	RF0011000	0.68	5.85	nie	0.180	43.6
TB11/CBC/20_45	0.74	16.78	RF0000000	0.71	5.45	tak	0.211	55.3
TB11/CBC/20_1	0.80	16.96	RF0010000	0.68	5.50	tak	0.165	61.0
TB11/CBC/20_2	0.73	17.13	RF0010000	0.66	5.50	tak	0.143	57.3

¹⁾ długość odcinka interakcji pojazdu z barierą

²⁾ poprawne zachowanie pojazdu w polu odbicia

³⁾ energia pochłonięta w wyniku niszczenia materiałów

⁴⁾ prędkość residualna

8. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych nakładki kompozytowo-pianowej CFR2, na przebieg wirtualnego testu zderzeniowego TB11 dla bariery SP-05/2 w łuku poziomym wklęsłym o promieniu 150 m. Modyfikacje nakładki CFR2 obejmują wpływ rdzenia piankowego i laminatu tylnego oraz wpływ sekwencji warstw i grubości laminatu przedniego.

Z przeprowadzonych wirtualnych badań zderzeniowych typu TB11, wynikają następujące wnioski:

- 1) Wypełnienie piankowe i laminat tylny mają bardzo duże znaczenie w nakładce CFR2. Bez tych elementów nakładka traci swoją funkcjonalność. Podczas wirtualnego testu zderzeniowego TB11 dla bariery SP-05/2 w łuku o promieniu 150 m, jeden z segmentów nakładki traci integralność z systemem powstrzymywania i następuje zarzucenie pojazdu.

- 2) Zmiana sekwencji ułożenia warstw tkaniny z [0/90] na [45/-45] w nakładce CFR2 wpływa na poprawę większości parametrów zderzenia. Jednak wyprowadzenie pojazdu na jezdnię jest gorsze, ponieważ pojazd jest bliski zarzuceniu.
- 3) Dodanie jednej lub dwóch warstw tkaniny [0/90] w nakładce CFR2 nie poprawia w istotny sposób parametrów zderzenia. Nakładka CFR2 bez dodatkowych warstw, a więc tańsza, jest wystarczająca do uzyskania bardzo dobrych parametrów zderzenia i przyjęcia badania zderzeniowego TB11.

Z przeprowadzonych analiz numerycznych wynika, że zaproponowane w pracy [15] rozwiązanie konstrukcyjne nakładki CFR2 jest trafne i wystarczające do zapewnienia przyjęcia badań zderzeniowych TB11.

Finansowanie

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego PBS1/B6/14/2012 (akronim ENERBAR), finansowanego w latach 2013–2015 przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- [1] Atahan, A O. Finite element simulation of a strong-post W-beam guardrail system. *Simulation*, 78, 10 (2002), pp. 587–599.
- [2] Biegus A. Połączenia śrubowe. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa-Wrocław 1997.
- [3] Borkowski W, Hryciów Z, Rybak P, Wysocki J. Analiza skuteczności betonowych barier ochronnych na łuku drogi. *Przegląd Mechaniczny*, Rok LXXI, Z. 7-8/2012, ss. 21–24
- [4] Borkowski W, Hryciów Z, Rybak P, Wysocki J. Numerical simulation of the standard TB11 and TB32 tests for a concrete safety barrier. *J. KONES Powertrain and Transport*, 17, 4 (2010), pp. 63–71.
- [5] Borkowski W, Hryciów Z, Rybak P, Wysocki J. Testing the results of a passenger vehicle collision with a rigid barrier. *J. KONES Powertrain and Transport*, 17, 1 (2010), pp. 51–57.
- [6] Borovinsek M, Vesenjaka M, Ulbin M, Ren Z. Simulating the impact of truck on road-safety barrier. *Journal of Mechanical Engineering*, 52 (2006) 2, pp. 101–111.
- [7] Borovinsek M, Vesenjaka M, Ulbin M, Ren Z. Simulation of crash test for high containment levels of road safety barriers. *Engineering Failure Analysis*, 14 (2007), pp. 1711–1718.
- [8] Dziewulski P. Examination of Selected Structures to Improve Energy Intensity of Road Safety Barriers (in Polish). PhD Thesis, Military University of Technology, Warsaw, Poland, 2010.
- [9] Dziewulski P. Numerical analysis of car – road barrier crash tests [in Polish]. *Proc. III Symp. on Advances in Manufacturing Technologies and Machinery Structures*, Kazimierz Dolny, Poland, pp. 43–49, 2009.

- [10] Goubel C, Di Pasquale E, Massenzio M, Ronel S. Comparison of crash tests and simulations for various vehicle restraint systems. 7th European LS-DYNA Conference. DYNAmore, GmbH, 2009, CD Proc. pp. 1–12.
- [11] Hallquist J O. LS-DYNA Keyword User's Manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA, May 2007.
- [12] Hallquist J O. LS-DYNA Theory Manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA, March 2006.
- [13] Kiczko A, Niezgoda T, Nowak J, Dziewulski P. Numerical implementation of car impact into the modified road barrier. *J. KONES Powertrain and Transport*, 17, 3 (2010), pp. 189–196.
- [14] Klasztorny M, Kiczko A, Nycz D. Modelowanie numeryczne i symulacja rozciągania połączenia śrubowego segmentów prowadnicy B bariery drogowej. 13. Konf. Nauk.-Tech. Techniki Komputerowe w Inżynierii, Licheń Stary, 2014, ss. 77-78.
- [15] Klasztorny M, Nycz D B, Romanowski R K. Rubber/foam/composite overlay onto guide B of barrier located on road bend. *The Archives of Automotive Engineering*, 69, 3 (2015), pp. 65-86.
- [16] Klasztorny M, Romanowski R K, Nycz D B. Nakładka kompozytowo-pianowa na prowadnicę B drogowej bariery ochronnej w łuku poziomym wklęsłym – część 1: Projekt nakładki na prowadnicę bariery SP-05/2, *Materiały kompozytowe*, 3/2015, pp. 36-38.
- [17] Klasztorny M, Romanowski R K, Nycz D B. Nakładka kompozytowo-pianowa na prowadnicę B drogowej bariery ochronnej w łuku poziomym wklęsłym – część 2: Modelowanie i symulacja testów zderzeniowych. *Materiały kompozytowe*, 4/2015, ss. 8-10.
- [18] Nasution R P, Siregar R A, Fuad K, Adom A H. The effect of ASI (Acceleration Severity Index) to different crash velocities. *Int. Conf. on Applications and Design in Mechanical Engineering (ICADME)*, Malaysia, 11–13 October 2009, CD Proc. of pp.1–6.
- [19] Niezgoda T, Barnat W, Dziewulski P, Kiczko A. Numerical modelling and simulation of road crash tests with the use of advanced CAD/CAE systems. *Journal of KONBiN*, 23, 3 (2012), pp. 95–108.
- [20] Nycz D. Modelowanie i badania numeryczne testów zderzeniowych bariery klasy N2-W4-A na łukach dróg. Wydawnictwo WAT. Warszawa 2015.
- [21] Vesenjnak M., Borovinšek M., Ren Z. Computational simulations of road safety barriers using LS-DYNA. 6. LS-DYNA Anwenderforum. DYNAmore, GmbH, Frankenthal. 2007, CD Proc. pp. 1-8.
- [22] Wade B, Feraboli P, Osborne M. Simulating laminated composites using LS-DYNA material model MAT54 part I: [0] and [90] ply single-element investigation [cited: 2014 Sep 22]. Available from: https://depts.washington.edu/amtas/events/jams_12/papers/paper-feraboli.pdf.

- [23] PN-EN 1317-1:2010. Systemy ograniczające drogę – część 1: Terminologia i ogólne kryteria metod badań.
- [24] PN-EN 1317-2:2010. Systemy ograniczające drogę – część 2: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań zderzeniowych i metody badań barier ochronnych i balustrad.
- [25] Stalowe bariery ochronne, Stalprodukt S.A., Bochnia, 2006.
- [26] System N2 W4 (SP-5/2), Stalprodukt S.A., Bochnia, 2011.
- [27] <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>, Vehicle Models, NCAC, USA, January 7, 2013.