

NAKLADKA KOMPOZYTOWO-PIANOWO-GUMOWA NA PROWADNICĘ B BARIERY NA ŁUKU DROGI

MARIAN KLASZTORNY¹, DANIEL B. NYCZ², ROMAN K. ROMANOWSKI³

Wojskowa Akademia Techniczna, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Sanoku,
ROMA Sp. z o.o. w Grabowcu

Streszczenie

W pracy rozpatruje się barierę skrajną SP-05/2 klasy N2-W4-A (producent Stalprodukt SA, Bochnia) z prowadnicą typu B, na łuku poziomym drogi głównej ruchu przyspieszonego (GP), o promieniu dopuszczalnym w osi drogi 140-220m. W celu zapewnienia przyjęcia testu zderzeniowego TB11 zaprojektowano nakładkę kompozytowo-pianowo-gumową, którą połączono z prowadnicą B za pomocą złączy śrubowych, z wykorzystaniem tylko wolnych otworów w osi prowadnicy, występujących co 2,00m. Nakładka jest uniepalniona, odporna na czynniki atmosferyczne i wymagane chemiczne, zwiększa elastyczność i wytrzymałość bariery, zmniejsza tarcie między pojazdem a barierą, a jej trwałość wynosi 30 lat.

Opracowano metodykę modelowania numerycznego i symulacji niezmodyfikowanego (bariera prostoliniowa) i zmodyfikowanego (bariera w łuku poziomym wklęsłym) testu zderzeniowego TB11, bez nakładki oraz z nakładką, z uwzględnieniem złączy podatnych o ograniczonej nośności, kontaktu z tarciami, ciśnienia w oponach, zamocowania słupków w odkształcalnym podłożu, obciążenia grawitacyjnego, tłumienia drgań i in.

Przeprowadzono wirtualne testy zderzeniowe TB11 w odniesieniu do czterech ww. układów konstrukcyjnych bariery. Model pojazdu Suzuki Swift, odpowiednio poprawiony, zaczerpnięto z biblioteki publicznej National Crash Analysis Center w USA. Do symulacji testów zderzeniowych zastosowano nieliniowy jawny kod Metody Elementów Skończonych LS-Dyna v971. Wyniki obejmują wszystkie parametry zderzenia wymagane przez normy PN-EN 1317. Wykazano, że bariera SP-05/2 z nakładką na łukach dróg GP zapewnia przyjęcie badania zderzeniowego TB11.

Słowa kluczowe: bariera drogowa w łuku, łuk poziomy wklęsły, nakładka kompozytowo-pianowo-gumowa, test zderzeniowy TB11, modelowanie, symulacja

1. Wstęp

Normy [10, 11] definiują testy zderzeniowe i parametry zabezpieczenia drogowych barier

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: m.klasztorny@gmail.com

² Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa, ul. Mickiewicza 21, 38-500 Sanok, e-mail: daniel.nycz@interia.pl

³ ROMA Sp. z o.o., ul. Stoneczna 7, Grabowiec, 87-124 Złotonia, e-mail: rromanowski@roma.torun.pl

ochronnych w odniesieniu do barier prostoliniowych. W przypadku zderzenia pojazdu z barierą zewnętrzną na łuku drogi może wystąpić zarzucenie pojazdu, zwiększenie szerokości pracującej, a nawet zatrzymanie pojazdu przez barierę. Celowe jest zatem przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych w kierunku weryfikacji ww. tezy, a także modyfikacji barier w celu przyjęcia badań zderzeniowych.

Modelowanie i weryfikacja eksperymentalna drogowych testów zderzeniowych jest przedmiotem szeregu publikacji. W pracy [25] rozpatruje się prostoliniową barierę drogową z prowadnicą typu A, w której zastosowano łatwo odkształcalne elementy dystansowe łączące prowadnicę ze słupkami. W modelowaniu uznano, że prowadnica jest belką ciągłą. Przyjęto model sprężysto-plastyczny stali. W celu walidacji modelowania wyniki numeryczne (indeks ASI, szerokość pracująca) odpowiadające testowi TB11 [11] porównano z wynikami eksperymentalnymi.

W pracy [4] przeprowadzono modelowanie i symulację testów zderzeniowych TB11 i TB42, zdefiniowanych w normie [11]. Modele pojazdów zaczerpnięto z biblioteki publicznej National Crash Analysis Center (NCAC) w USA [31]. Dokonano w nich kilku modyfikacji. Części bariery prostoliniowej modelowano za pomocą elementów powłokowych. Śruby modelowano za pomocą elementów belkowych lub typu spot-weld [12]. Grunt modelowano za pomocą elementów sprężysto-tłumiących. Prowadnicę potraktowano jako belkę ciągłą. Badano wpływ czterech zmian konstrukcyjnych w barierze drogowej na odpowiedź dynamiczną: 1) wprowadzenie pasa rozciąganego, 2) wprowadzenie prowadzenia rolkowego, 3) wprowadzenie liny w górnej części prowadnicy, 4) wprowadzenie liny w dolnej części prowadnicy. Testy wirtualne porównano z rzeczywistymi testami zderzeniowymi. Analizie poddano parametry ASI, THIV i PHD dla testu TB11 oraz szerokości pracującej W dla testu TB42.

W pracy [8] przeprowadzono modelowanie numeryczne MES i symulacje testu zderzeniowego TB11 w odniesieniu do prostoliniowego odcinka (36,00 m) bariery drogowej SP-05/4 (słupki co 4,00 m, producent Stalprodukt SA, Bochnia), bez nakładki lub z nakładką energochłonną. Model numeryczny pojazdu Suzuki Swift pobrano z biblioteki publicznej NCAC [31]. Zastosowano nakładkę energochłonną stalowo-pianową o przekroju trapezowym, która jest połączona z prowadnicą typu B wzdłuż górnej i dolnej krawędzi za pomocą nitowania. Założono, że słupki są utwierdzone w sztywnym podłożu. Badano wpływ gęstości wypełnienia piankowego nakładki na energię pochłanianą przez barierę i na zmianę prędkości środka ciężkości samochodu.

W pracy [16] przeprowadzono badania eksperymentalne i numeryczne uderzenia prostopadłego samochodu Suzuki Swift z prędkością 45,5 km/h w odcinek bariery SP-04/2, bez nakładki i z nakładką kompozytowo-pianową. Nakładka składa się z kompozytu poliestrowo-szklanego (jedna warstwa tkaniny z przeplotem prostym, o gramaturze 450 g/m²) o zarysie trapezowym i wypełnienia z pianki poliuretanowej. Prowadnica została przymocowana do słupków IPE140. Słupki utwierdzone w płycie betonowej. Porównano przebiegi czasowe przyspieszenia środka masy pojazdu, deformacje pojazdu i bariery oraz energochłonność bariery.

Borkowski i in. [2] przeprowadzili badania numeryczne wpływu kąta najazdu samochodu

Suzuki Swift na betonową barierę drogową. W pracy pokazano trajektorie ruchu oraz deformacje pojazdu, odpowiadające kątom zderzenia 10°, 20°, 30°, 40°. Model numeryczny pojazdu zaczerpnięto z biblioteki NCAC. W kolejnej pracy [3] rozwinięto modelowanie numeryczne i symulacje testów zderzeniowych TB11 i TB32, przy uwzględnieniu nieruchomych lub ruchomych segmentów betonowej bariery drogowej. Wyniki obejmują zachowanie i deformacje pojazdów oraz indeks ASI. Testy wykonano z użyciem modeli samochodów Suzuki Swift (TB11) i Dodge Neon (TB32), zaczerpniętych z biblioteki publicznej NCAC. Odształcalne łączniki i złącza modelowano za pomocą elementów powłokowych 4-węzłowych.

Z przeglądu baz patentowych wynika, że zgłaszane są różne rozwiązania modyfikujące konstrukcje barier drogowych [1, 5-7, 14, 15, 20-24, 26, 27]. Dotychczasowe patenty i zgłoszenia patentowe nie dotyczą barier drogowych na łukach dróg. W patentach [5-7, 15, 20, 24, 27] zaproponowano różne modyfikacje złączy bariery drogowej ze słupkami. Traci się w ten sposób odpowiednią sztywność bariery i stabilność prowadnicy w czasie zderzenia. W patencie [21] zaproponowano osłonę całej bariery drogowej, łącznie ze słupkami i prętem poziomym dolnym, w formie owalnego płaszcza z materiału odształcalnego (gumotkanina), wypełnionego pianką w otoczeniu prowadnicy, ze złączami napinającymi osłony z tyłu. Rozwiązanie to jest przeznaczone do ochrony motocyklistów.

W patencie [23] zastosowano rozwiązanie w postaci falistego elementu energochłonnego zastępującego wspornik między prowadnicą a słupkiem. W rozwiązaniu tym założono, że w przypadku zderzenia z barierą element energochłonny skróci się plastycznie i pochłonie energię zderzenia. Nie wzięto jednak pod uwagę, że zbyt podatne plastyczne złącze między prowadnicą a słupkami spowoduje, że prowadnica utraci stabilność. Podobne rozwiązanie jest zawarte w patencie [14]. W zgłoszeniu patentowym [1] zaproponowano urządzenie równoległe do prowadnicy, zamontowane pod prowadnicą, ułatwiające poślizg pojazdu przez wprowadzenie zbioru wałków wertykalnych oraz pochłaniające energię za pomocą blachy falistej. Według autorów tego typu urządzenie zadziałałoby w przypadku nieodształcalnej bariery betonowej.

W patencie [26] zastosowano powłokę kompozytową termoplastyczną zbrojoną, o grubości zbliżonej do grubości prowadnicy, dopasowanej kształtem do prowadnicy. Powłoka kompozytowa jest zamocowana do prowadnicy typu A za pomocą dodatkowych śrub oraz za pomocą śrub łączących prowadnicę ze słupkami i segmenty prowadnicy ze sobą. Autor twierdzi, że powłoka ma duże własności energochłonne.

W zgłoszeniu patentowym [22] zaprojektowano trapezową lub półkolistą wielowarstwową nakładkę energochłonną na prowadnicę B bariery drogowej. Segmenty nakładki nie są ze sobą połączone.

W pracy rozpatruje się barierę skrajną SP-05/2 klasy N2-W4-A (producent Stalprodukt SA, Bochnia) z prowadnicą typu B, na łuku poziomym drogi głównej ruchu przyspieszonego (GP), o promieniu dopuszczalnym w osi drogi 140-220 m. W celu zapewnienia przyjęcia testu zderzeniowego TB11 zaprojektowano nakładkę kompozytowo-pianowo-gumową, którą połączono z prowadnicą B za pomocą złączy śrubowych, z wykorzystaniem tylko wolnych otworów w osi prowadnicy, występujących co 2,00 m. Nakładka jest uniepalniona, odporna

na czynniki atmosferyczne i wymagane chemiczne, zwiększa elastyczność i wytrzymałość bariery, zmniejsza tarcie między pojazdem a barierą, a jej trwałość wynosi 30 lat.

Opracowano metodykę modelowania numerycznego i symulacji niezmodyfikowanego (bariera prostoliniowa) i zmodyfikowanego (bariera w łuku poziomym wklęsłym) testu zderzeniowego TB11, bez nakładki oraz z nakładką, z uwzględnieniem złączy podatnych o ograniczonej nośności, kontaktu z tarciami, ciśnienia w oponach, zamocowania słupków w odkształcalnym podłożu, obciążenia grawitacyjnego, tłumienia drgań i in. Przeprowadzono wirtualne testy zderzeniowe TB11 w odniesieniu do czterech ww. układów konstrukcyjnych bariery.

2. Wskaźniki testów zderzeniowych

Norma [10] określa kryteria badań zderzeniowych i metody badań, którym powinny być poddane systemy ograniczające drogę. Norma [11] opisuje klasy działania barier ochronnych przez określenie ich cech funkcjonalnych, takich jak: poziom powstrzymywania, szerokość pracująca, poziom intensywności zderzenia. Normy [10, 11] nie uwzględniają zakrętów dróg.

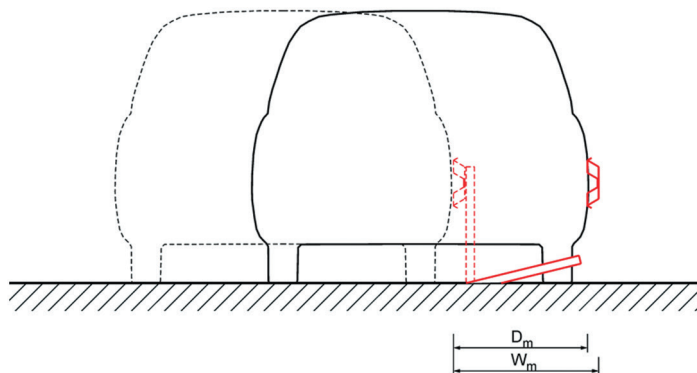
Poziomy powstrzymywania są określane na podstawie badań zderzeniowych i dzielą się na [2]: małe T1, T2, T3; normalne N1, N2; podwyższone H1, H2, H3; bardzo wysokie H4a, H4b. W przypadku poziomu powstrzymywania N2 wymagane jest przyjęcie badań zderzeniowych TB11, TB32 (tabela 1).

Tabela 1. Kryteria badań zderzeniowych TB11 i TB32 [2]

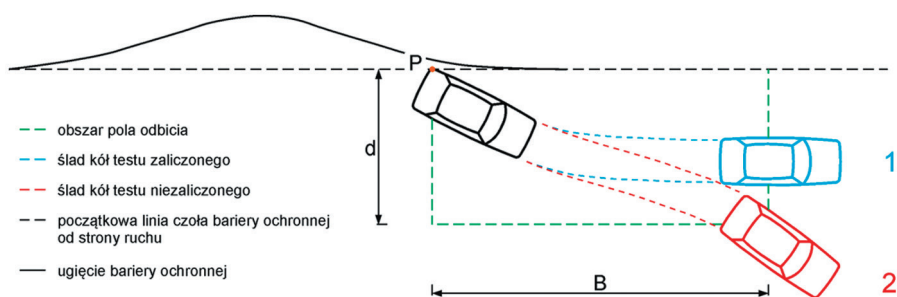
Badanie	Prędkość zderzenia	Kąt zderzenia	Masa całkowita pojazdu	Typ pojazdu
TB11	100 km/h	20°	900 kg	samochód osobowy
TB32	110 km/h	20°	1500 kg	samochód osobowy

Poziomy intensywności zderzenia jest parametrem odzwierciedlającym oddziaływanie zderzenia na osoby znajdujące się w pojeździe, oceniany na podstawie wartości wskaźnika intensywności przyspieszenia ASI oraz prędkości teoretycznej głowy w czasie zderzenia THIV. Wskaźnik intensywności przyspieszenia ASI jest wielkością bezwymiarową, obliczaną na podstawie przebiegów czasowych składowych kartezyjskich przyspieszenia w środku ciężkości pojazdu, według złożonego algorytmu podanego w [10]. Prędkość teoretycznej głowy w czasie zderzenia, THIV, jest obliczana według złożonego algorytmu również podanego w [10]. Poziomowi intensywności przyspieszenia A według [11] odpowiadają warunki: $ASI \leq 1.0$, $THIV \leq 33$ km/h.

Szerokość pracująca W jest odległością między boczną powierzchnią czołową bariery od strony ruchu przed zderzeniem a maksymalnym dynamicznym bocznym położeniem dowolnej większej części bariery (rys. 1). Szerokość pracująca jest miarą odkształcenia bariery. Norma [11] wyróżnia 8 poziomów szerokości pracującej; w przypadku poziomu W4 odległość $W \leq 1,3$ m. Bariera i nakładka powinny zachować integralność po kolizji z pojazdem.



Rys. 1. Ugięcie dynamiczne D_m oraz szerokość pracująca W_m na przykładzie bariery bez wysięgnika [11]



Rys. 2. Trajektorie ruchu tylnych kół pojazdu oraz pole odbicia [11]

Parametr VCDI jest wskaźnikiem odkształcenia kabiny pojazdu. Zapis parametru VCDI obejmuje zarówno miejsce, jak i rozległość uszkodzeń kabiny pojazdu, w formie XYabcdefg, gdzie: XY – miejsce odkształcenia (symbole literowe), abcdefg – siedem indeksów określających procentowe zmniejszenie siedmiu charakterystycznych wewnętrznych wymiarów kabiny pojazdu [11].

Samochód osobowy, po zderzeniu z barierą i przesuwaniu się w kontakcie z barierą, powinien odbić się od bariery tak, aby ślady kół nie przekroczyły linii równoległej do pierwotnej linii czoła bariery od strony ruchu, znajdującej się w odległości $d=2,2 \text{ m} + \text{szerokość pojazdu} + 16\% \text{ długości pojazdu}$ (rys. 2). W przypadku pojazdu Suzuki Swift otrzymuje się $d=4,4 \text{ m}$. Nieprzekroczenie linii dotyczy pola odbicia o długości $B=10 \text{ m}$, mierzonego od punktu wyjścia ostatniego koła poza pierwotną linię czoła bariery. Niedopuszczalne jest zablokowanie pojazdu przez barierę, przewrócenie lub zarzucenie pojazdu.

Masa łączna pojazdu obejmuje również manekina ATD (antropomorficzne urządzenie testowe reprezentujące 50-ty percentyl dorosłych mężczyzn), stosowanego w badaniu eksperymentalnym TB11 do oceny przemieszczania się osoby w pojeździe w trakcie testu zderzeniowego.

3. Badane systemy oraz testy zderzeniowe objęte symulacjami

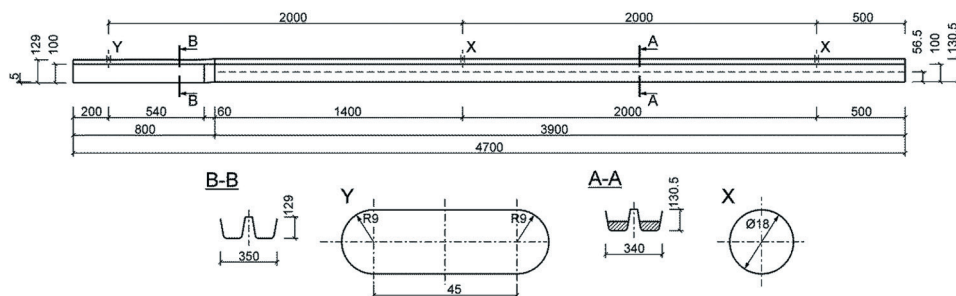
Przedmiotem badań jest bariera drogowa SP-05/2, klasy N2-W4-A. Producentem bariery (CE No. 1826-CPD-2.9.07-DR17) jest firma Stalprodukt SA, Bochnia. Bariera jest wykonana ze stali S235JR ocynkowanej ogniowo. We wszystkich połączeniach zastosowano śruby M16, klasy 4.6. W barierze występują: prowadnica B oraz słupki Sigma-100 o długości 1,90 m, w rozstawie co 2,00 m. Wyniki badania zderzeniowego TB11, podane przez producenta na stronie internetowej, wynoszą: ASI = 0,8, W = 1,00 m, THIV = 23 km/h, VCDI = RF0001000.

Odcinki testowe bariery o długości 58,00 m odpowiadają barierze prostoliniowej (SB) oraz barierze w łuku o promieniu 150 m (CB). Jest to najmniejszy promień krzywizny bariery zewnętrznej na łukach dróg GP. Rozpatruje się barierę bez nakładki (SB, CB) oraz z nakładką CFR2 (SBC, CBC), przy czym oznaczenia SB, CB, SBC, CBC pochodzą od angielskich określeń: Straight/Curved Barrier without/with Covering. Wirtualne testy zderzeniowe objęte pracą mają zatem następujące kody: TB11/SB/20, TB11/SBC/20, TB11/CB/20, TB11/CBC/20. Punkt przecięcia osi podłużnej pojazdu z osią prowadnicy został ustawiony w odległości 8,00 m przed środkiem 58 m odcinka bariery. Zastosowano model pojazdu Geo Metro (Suzuki Swift) z biblioteki NCAC [5], który poddano niezbędnym modyfikacjom (vide punkt 6).

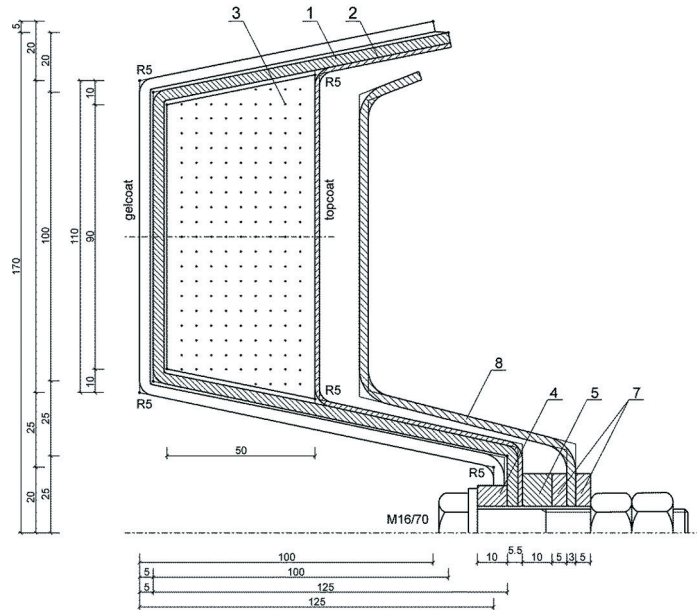
4. Opis nakładki CFR2

Nakładka niepalniona CFR2 [17] składa się z segmentów kompozytowych poliestrowo-szklanych, częściowo wypełnionych pianką poliuretanową (rys. 3–5). Segmenty są połączone z prowadnicą za pomocą śrub M16/80 klasy 8.8, przy zastosowaniu grubych (10 mm) prostokątnych podkładek gumowych wytworzonych z gumy 70°ShA EPDM oraz podkładek stalowych prostokątnych ocynkowanych ogniowo, typu A, zlokalizowanych w pustych otworach w osi podłużnej prowadnicy. Segmenty są wytwarzane w technologii kontaktowej. Nakładka CFR2 ma gładką powierzchnię przednią, zabezpieczoną warstwą żelkotu.

Ciągły układ nakładkowy CFR2 składa się z segmentów o długości 4,70 m, nakładających się na siebie w taki sposób, że długość wynikowa segmentu wynosi 4,00 m (rys. 3–5). Przekrój poprzeczny nakładki jest skorelowany z przekrojem poprzecznym prowadnicy

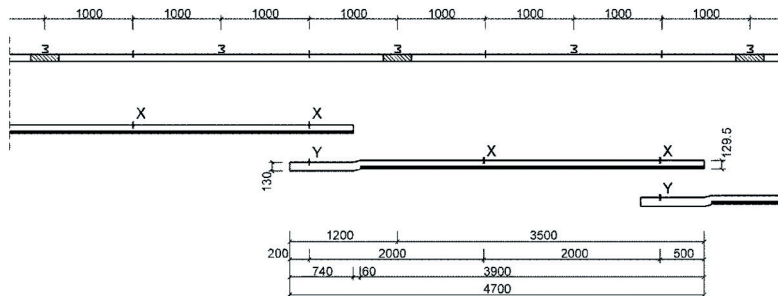


Rys. 3. Segment nakładki CFR2

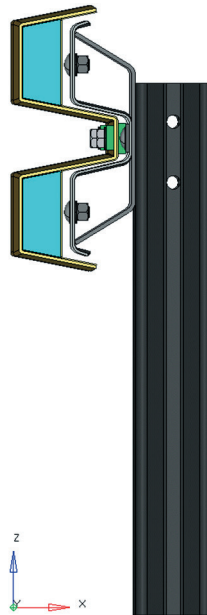


Rys. 4. Przekrój poprzeczny nakładki CFR2 w osi węzła X: 1 – laminat przedni; 2 – laminat tylny; 3 – pianka poliuretanowa; 4 – podkładka gumowa przednia; 5 – podkładka gumowa tylna; 6 – śruba stalowa; 7 – podkładka prostokątna ocynkowana ogniowo typu A (producent: Stalprodukt SA, Bochnia); 8 – prowadnica typu B

typu B, z uwzględnieniem luzów na pokrycie zakrzywienia bariery, złączy śrubowych, imperfekcji wykonawczych oraz odkształceń termicznych. Zastosowano wykrąglenia technologiczne w narożach, o promieniu średnim 5 mm. Nakładka CFR2 jest złożona z powłoki kompozytowej GFRP przedniej, powłoki kompozytowej GFRP tylnej i rdzenia piankowego w dwóch kanałach. Sekwencja warstw powłoki kompozytowej przedniej, o całkowitej grubości 4mm, jest następująca: żelkot, mata CSM450, dwie warstwy tkaniny zrównoważonej z przeplotem prostym WR600 [0/90], gdzie kierunek 0 pokrywa się z osią bariery. Powłoka kompozytowa tylna, o całkowitej grubości 1,5mm, zamykająca kanały z pianką,



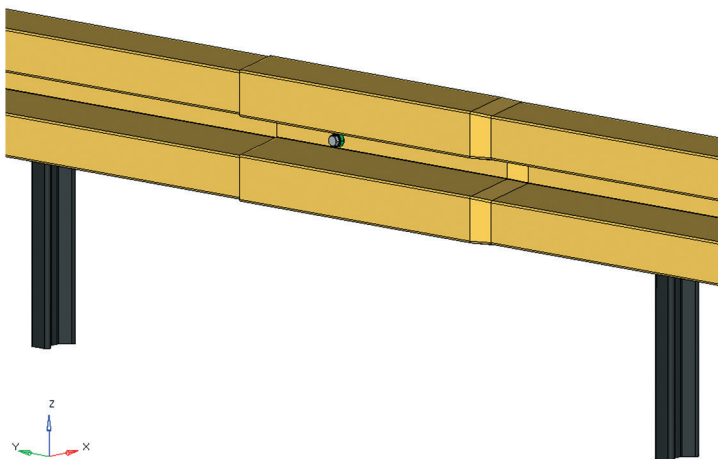
Rys. 5. Schemat łączenia segmentów nakładki CFR2



Rys. 6. Bariera drogowa SP-05/2 z nakładką CFR2 - widok z boku

jest wzmocniona jedną warstwą maty CSM450 i zabezpieczona warstwą topkotu. Matrycę kompozytów stanowi żywica poliestrowa niepalniona Polimal 104S (producent: Organika-Sarzyna, Sarzyna). Zastosowano piankę poliuretanową PUR S-42, o gęstości 42 kg/m^3 .

Nakładka CFR2 zachowuje właściwości eksploatacyjne przewodnicy B, m.in. ślizganie się pojazdu po dwóch pasach nakładki na odpowiedniej wysokości i montaż elementów



Rys. 7. Bariera drogowa SP-05/2 z nakładką CFR2 - widok izometryczny z przodu (połączenie segmentów nakładki)

odblaskowych w kanale w osi nakładki. Wizualizację graficzną bariery SP-05/2 z nakładką pokazano na rys. 6, 7.

Zasada działania nakładki CFR2 jest następująca: po uderzeniu pojazdu w barierę pod kątem 20° następuje sprężysta deformacja nakładki i podkładek gumowych. Impuls uderzenia ulega wydłużeniu w czasie. Nakładka zbliża się do prowadnicy B i opiera na niej. Pojawia się niszczenie progresywne głównych komponentów nakładki (powłoki kompozytowe i rdzeń piankowy), ale w stopniu zachowującym integralność nakładki i niezerwanie złączy śrubowych. Podkładki gumowe uelastyczniają proces zderzenia. Tarcie między pojazdem a żelkodem pokrywającym nakładkę jest znacznie mniejsze w porównaniu z prowadnicą stalową, co ułatwia ślizganie się pojazdu po barierze z nakładką i wpływa na zabezpieczenie pojazdu przed zarzuceniem.

5. Modele materiałowe części układu

W opisie modeli materiałowych i modelowania numerycznego kolejnych części układu nakładka/bariera/podłoże gruntowe zastosowano oryginalne nazwy i określenia użyte w podręcznikach [12, 13] systemu LS-Dyna.

Stale materiałowe stali S235JR, z której wytwarzane są części bariery drogowej, zaczerpnięto z karty danych [29]. Właściwości elastoplastyczne stali ze wzmocnieniem izotropowym odwzorowano za pomocą modelu *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_024). Niszczenie stali jest zdefiniowane przez graniczne efektywne odkształcenie plastyczne. W tabeli 2 zestawiono wartości stałych materiałowych stali S235JR. Wartość modułu stycznego oraz granicznego odkształcenia plastycznego pochodzi z pracy [19].

Tabela 2. Stale materiałowe stali S235JR

Stała*	Wartość	Jednostka*	Nazwa stałej materiałowej
RO	$7,850 \times 10^{-9}$	t/mm ³	gęstość materiału
E	210000	MPa	moduł Younga
PR	0,3	-	stała Poissona
SIGY	372	MPa	granica plastyczności
ETAN	1000	MPa	moduł styczny
FAIL	0,5	-	odkształcenie plastyczne odpowiadające zniszczeniu materiału (erozja)

* Zastosowano oznaczenia i jednostki używane w systemie LS-Dyna.

Laminat GFRP (tworzywo sztuczne wzmocnione włóknem szklanym), wzmocniony wybranymi matami i tkaninami, jest modelowany jako materiał lepkosprężysto-kruchy, opisany przez model materiałowy *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE (*MAT_054). Model ten jest adresowany głównie do kompozytów wzmocnionych jednokierunkowo, stąd zachowanie kompozytów występujących w nakładce CFR2 jest tylko aproksymowane. Model

ten uwzględnia kryterium niszczenia Chang – Chang [13]. Stałe materiałowe kompozytów jednorodnych, wzmocnionych tkaniną WR600 lub matą CSM450, zidentyfikowano eksperymentalnie w Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji Katedry Mechaniki Informatyki Stosowanej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Badania wykonano zgodnie z odpowiednimi normami w temperaturze pokojowej (20°C). Stałe materiałowe lamin zestawiono w tabeli 3.

Pianka poliuretanowa PUR S-42 jest odwzorowana przez model materiałowy *MAT_HONEYCOMB (*MAT_026). Służy on do modelowania materiałów przekładkowych oraz pian o właściwościach anizotropowych. Stałe materiałowe (tabela 4) oraz wykres naprężenia stycznego w funkcji odkształcenia objętościowego i wykres naprężenia normalnego w funkcji odkształcenia objętościowego zaczerpnięto z pracy [9]. Podłoże gruntowe, w którym są zagłębione słupki Sigma-100, jest odwzorowane przez model *MAT_SOIL_AND_FOAM (*MAT_005). Jest to prosty model stosowany do pian i ośrodków gruntowych w przypadkach, w których stałe materiałowe nie są w pełni określone. Stałe materiałowe podłoża gruntowego, zestawione w tabeli 5, zaczerpnięto ze strony internetowej NCAC, USA [31]. Nawierzchnia asfaltowa/betonowa i pobocze modelowano jako powierzchnie nieodkształcalne. Współczynniki tarcia wynoszą 0,90 w odniesieniu do pary asfalt/beton – opona oraz 0,68 w odniesieniu do pary utwardzone podłoże – opona [30].

6. Model numeryczny pojazdu użyty w testach TB11

W wirtualnych testach zderzeniowych zastosowano model numeryczny MES samochodu Geo Metro (Suzuki Swift), opracowany przez NCAC, USA [31] (rys. 8). Zawieszenie pojazdu jest lepkosprężyste. Model numeryczny pojazdu zawiera ponad 200 modeli materiałowych przyporządkowanych poszczególnym częściom pojazdu. Między innymi, zastosowano następujące modele: *MAT_ELASTIC (*MAT_001), *MAT_RIGID (*MAT_020), MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_024), MAT_LINEAR_ELASTIC_DISCRETE_BEAM (*MAT_066).

Tabela 3. Stałe materiałowe lamin

Lp	Symbol LS-Dyna	Wartość		Jednostka	Nazwa stałej materiałowej
		CSM450	WR600		
1	RO	$1,420 \times 10^{-9}$	$1,680 \times 10^{-9}$	t/mm ³	gęstość materiału
2	EA	7060	15300	MPa	moduł Younga w kierunku włókien
3	EB	7060	15300	MPa	moduł Younga w kierunku matrycy
4	PRBA	0,386	0,140	-	współczynnik Poissona w płaszczyźnie laminatu
5	GAB	2080	1770	MPa	moduł Kirchhoffa w płaszczyźnie laminatu
6	GBC	2000	2000	MPa	moduł Kirchhoffa w płaszczyźnie YZ
7	GCA	2000	2000	MPa	moduł Kirchhoffa w płaszczyźnie XZ
8	YAFAC	2	2	-	osłabienie wytrzymałości na ściskanie włókien po zniszczeniu matrycy pod wpływem ściskania

Tabela 3. Stałe materiałowe lamin, cd.

9	DFAILT	0,02	0,02	-	maksymalne odkształcenia przy rozciąganiu włókien
10	DFAILC	-0,02	-0,02	-	maksymalne odkształcenia przy ściskaniu włókien
11	EFS	0,05	0,05	↖	efektywne odkształcenia niszczące
12	XC	216	197	MPa	wytrzymałość na ściskanie w kierunku włókien
13	XT	95,6	269	MPa	wytrzymałość na rozciąganie w kierunku włókien
14	YC	216	197	MPa	wytrzymałość na ściskanie w kierunku matrycy
15	YT	95,6	269	MPa	wytrzymałość na rozciąganie w kierunku matrycy
16	SC	45,5	34,8	MPa	wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie laminatu

Tabela 4. Stałe materiałowe piany poliuretanowej PUR S-42

Lp	Symbol	Wartość	Jednostka	Nazwa stałej materiałowej
1	R0	4.400×10^{-11}	t/mm ³	gęstość materiału
2	E	100	MPa	moduł Younga ściśniętego materiału piany
3	PR	0,3	-	współczynnik Poissona ściśniętego materiału piany
4	SIGY	50	MPa	granica plastyczności w pełni ściśniętego materiału piany
5	VF	0,1	-	względna objętość, przy której materiał jest w pełni ściśnięty
6	EAAU EBBU ECCU	0,5	-	moduł Younga materiału nieściśniętego w kierunkach A, B, C
7	GABU GBCU GCAU	1,0	MPa	moduł Kirchhoffa materiału nieściśniętego w kierunkach A, B, C

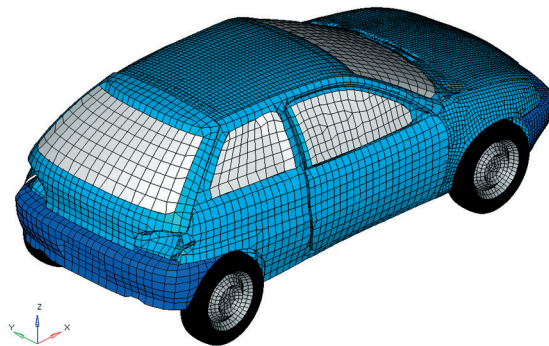
Tabela 5. Stałe materiałowe gruntu

Lp	Symbol	Wartość	Jednostka	Nazwa stałej materiałowej
1	R0	$1,700 \times 10^{-9}$	t/mm ³	gęstość materiału
2	G	49.5	MPa	moduł Kirchhoffa
3	K	185	MPa	moduł ściśliwości
4	AO	$1,213 \times 10^{-2}$	N ² /mm ⁴	stała funkcji plastyczności
5	PC	$-1,724 \times 10^{-1}$	MPa	ciśnienie graniczne przy rozciąganiu (wartość ujemna)

Na podstawie wstępnych testów numerycznych, określono następujące niezbędne modyfikacje w modelu pojazdu uderzającego w barierę pod kątem 20°:

- 1) zmiana modelu opon z modelu *AIRBAG na model *AIRBAG_SIMPLE_PRESSURE_VOLUME,
- 2) deklaracja ciśnienia w oponach 2,3 bar,
- 3) korekta zawieszenia (zastosowanie modelu materiałowego MAT_66 oraz elementów BEAM w sformułowaniu ELFORM_6, korekta sztywności i tłumienia zawieszenia, dodanie napięcia wstępnego w procesie dynamicznej relaksacji),
- 4) wprowadzenie relaksacji dynamicznej (wpływ sił ciężkości) przed rozpoczęciem procesu zderzenia pojazdu z barierą,
- 5) deklaracja prędkości liniowej pojazdu i prędkości kątowej kół w chwili początkowej,
- 6) korekta geometrii kół oraz osi obrotu kół,
- 7) korekta opcji kontaktu,
- 8) korekta kart kontrolnych,
- 9) kontrola hourglass (eliminacja niefizycznych form drgań),
- 10) umieszczenie ELEMENT_SEATBELT_ACCELEROMETER w środku ciężkości pojazdu na sztywnym elemencie bryłowym połączonym z podwoziem za pomocą więzów *CONSTRAINED_EXTRA_NODES,
- 11) korekta sztywności więzów.

Model numeryczny pojazdu składa się z ~33500 elementów skończonych.



Rys. 8. Model samochodu Suzuki Swift (Geo Metro) – widok izometryczny z góry [31]

7. Modelowanie numeryczne części układu

Części odcinka bariery SP-05/2 o długości 58m zdyskretyzowano, używając 4-węzłowych powłokowych elementów skończonych w sformułowaniu Belytshko-Tsay, z jednym punktem całkowania w płaszczyźnie elementu (ELFORM 2) i pięcioma punktami całkowania po

grubości. Przyjęto teoretyczną wartość współczynnika korekcyjnego naprężeń stycznych przy ścinaniu (SHRF =0,8333).

Podłoże odwzorowano przez walce (jeden walec dla każdego słupka oddzielnie) o promieniu 1,00 m i wysokości 1,30 m, używając bryłowych elementów skończonych w sformułowaniu ELFORM 1 (element bryłowy ze stałym naprężeniem). Dodatkowo, części gruntuowej przyporządkowano kontrolę hourglass typu sztywnościowego Flanagan-Belytshko (IHQ = 4, QM=0,03). Od góry grunt został zamknięty skorupą z elementów powłokowych o grubości 1 mm, którym przypisano właściwości materiału typu *_MAT_NULL (*MAT_009).

Pomiędzy każdym słupkiem a powłoką zamykającą grunt zdefiniowano kontakt typu *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE, uwzględniając tarcie suche ze współczynnikiem tarcia FS=0,30. Dodatkowo, w strefie uderzenia i kontaktu pojazdu z barierą o długości 16 m zdefiniowano kontakt *CONTACT_INTERIOR w odniesieniu do walców gruntowych, w celu poprawienia ich zachowania przy dużych zniekształceniach [13]. Bariera ochronna i podłoże przejawiają właściwości tłumiące wiskotyczne w sformułowaniu sztywnościowym (*DAMPING_PART_STIFFNESS), ze współczynnikami tłumienia stali COEF=0,03 i podłoża COEF=0,10.

Połączenia śrubowe podkładka–prowadnica–wspornik–słupek zamodelowano za pomocą *CONSTRAINED_GENERALIZED_WELD_SPOT. W karcie elementów podano wartości granicznej siły osiowej $S_n = 40200$ N oraz granicznej siły ścinającej $S_s = 23316$ N, przy których następuje zerwanie połączenia według wzoru [28]:

$$\frac{\max F_n}{S_n} + \frac{|F_s|}{S_s} \geq 1,$$

gdzie F_n , F_s – odpowiednio siła osiowa i siła ścinająca w połączeniu.

Modelowanie podatnych złączy śrubowych segmentów prowadnic ze sobą oraz z nakładką CFR2, stosowanych w barierze SP-05/2, zaprezentowano w pracy [18]. Każde złącze śrubowe segmentów prowadnic ze sobą odwzorowano za pomocą elementów sprężysto-tłumiących i wykorzystano w powłokowym modelu prowadnicy. Złącza śrubowe segmentów prowadnic z nakładką CFR2 odwzorowano za pomocą elementów *CONSTRAINED_GENERALIZED_WELD_SPOT, ponieważ zniszczeniu ulega najpierw powłoka kompozytowa. Modelowanie w tej wersji pozwala na symulację potencjalnego zerwania złączy w trakcie zderzenia z pojazdem.

Na rys. 9–12 pokazano model numeryczny bariery w łuku, bez nakładki i z nakładką CFR2.

Pomiędzy komponentami stalowymi bariery (prowadnica, słupki SIGMA, wsporniki, podkładki prostokątne) zdefiniowany został model kontaktu *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE z uwzględnieniem tarcia (współczynnik tarcia statycznego FS=0,25).

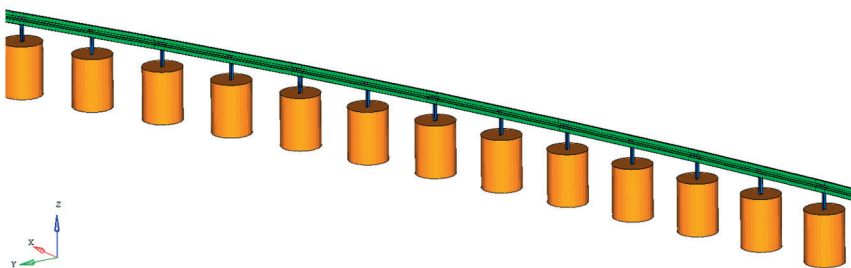
Laminaty zastosowane w nakładce CFR2 modelowano z użyciem 4-węzłowych elementów powłokowych w sformułowaniu Belytshko-Tsay, z jednym punktem całkowania (ELFORM 2) (rys. 12). Piankę poliuretanową modelowano z użyciem elementów bryłowych w sformułowaniu ELFORM 1, z kontrolą hourglass w sformułowaniu sztywnościowym Flanagan-Belytshko (IHQ = 4, QM = 0,05) (rys. 10). Nakładka wykazuje właściwości tłumiące lepkie

typu sztywnościowego (*DAMPING_PART_STIFFNESS), ze współczynnikami tłumienia laminatów $COEF=0,10$ oraz pianki $COEF=0,15$ [12, 13].

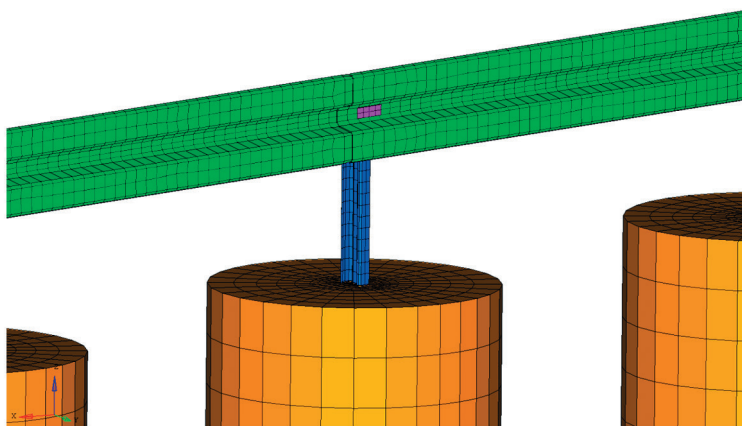
Kontakt między wszystkimi możliwymi parami części nakładki i bariery zdefiniowano za pomocą modelu *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE i odpowiednich współczynników tarcia kinetycznego, i.e. $FS=0,14$ między laminatami a elementami stalowymi, $FS=0,26$ między pianką a elementami stalowymi, $FS=0,30$ między pianką a laminatami.

Wartości współczynników tarcia kinetycznego dla poszczególnych par trących zidentyfikowano w Laboratorium Testów Tribologicznych Katedry Zaawansowanych Materiałów i Technologii Wydziału Inżynierii Materiałowej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

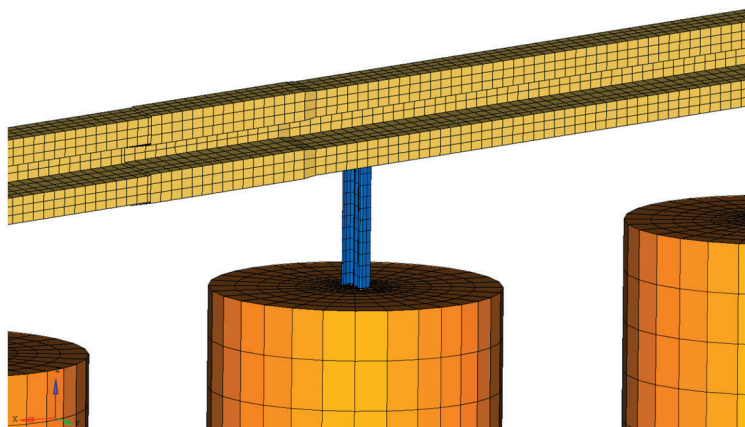
Model numeryczny układu bariera/nakładka/podłoże gruntowe zawiera ~158000 elementów skończonych.



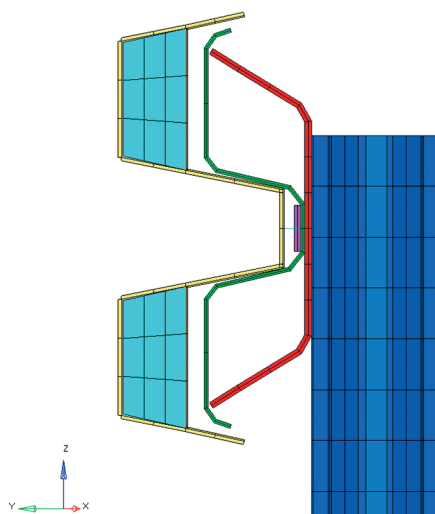
Rys. 9. Wizualizacja odcinka bariery zakrzywionej SP-05/2 - widok izometryczny



Rys. 10. Dyskretyzacja bariery SP-05/2 i gruntu - widok izometryczny z przodu



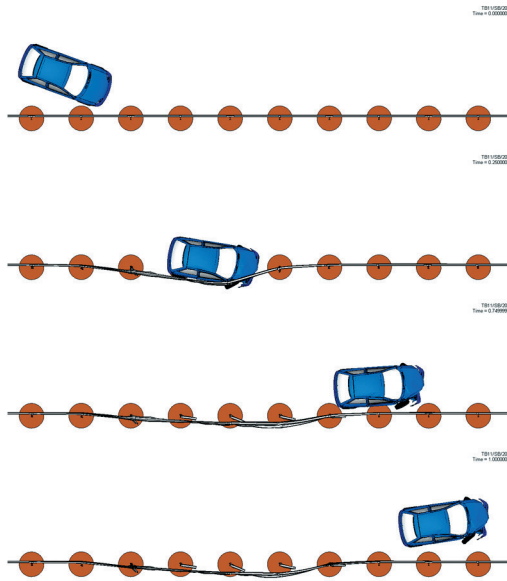
Rys. 11. Wycinek modelu MES bariery SP-05/2 z nakładką CFR2 – widok izometryczny z przodu



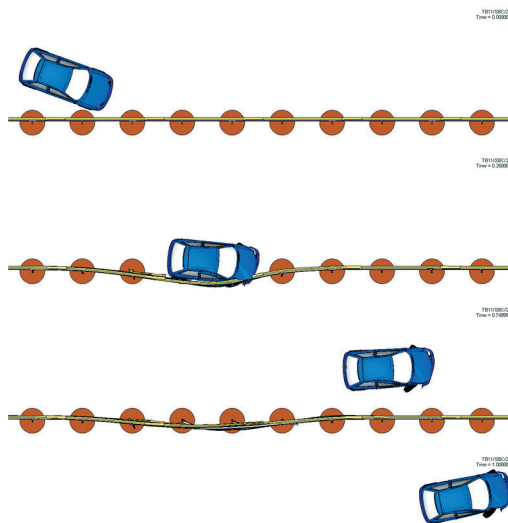
Rys. 12. Siatka MES pianki poliuretanowej oraz wizualizacja grubości elementów powłokowych z offsetem – widok z boku

8. Symulacja testów zderzeniowych

Wyniki symulacji testów zderzeniowych objętych niniejszą pracą zilustrowano na rys. 13–21. Położenia pojazdu ruchomego i bariery w wybranych punktach czasowych pokazano na rys. 13–18, odpowiednio w odniesieniu do testów TB11/SB/20 (rys. 13), TB11/SBC/20 (rys. 14), TB11/CB/20 (rys. 15, 16) and TB11/CBC/20 (rys. 17, 18). Na rys. 15, 16 widoczne jest niedopuszczalne zarzucenie i zatrzymanie pojazdu.



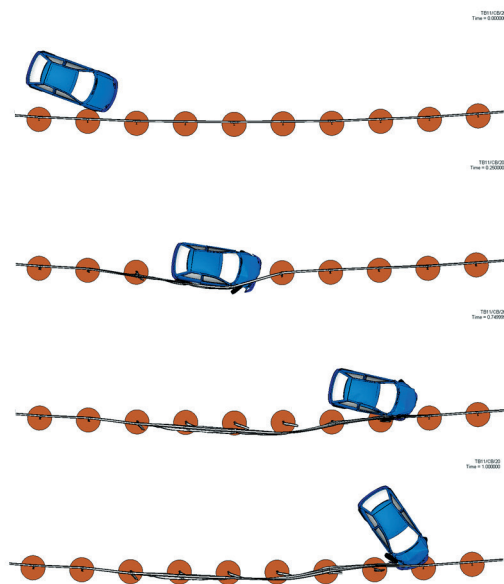
Rys. 13. Animacja testu zderzenia TB11/SB/20 – widok z góry



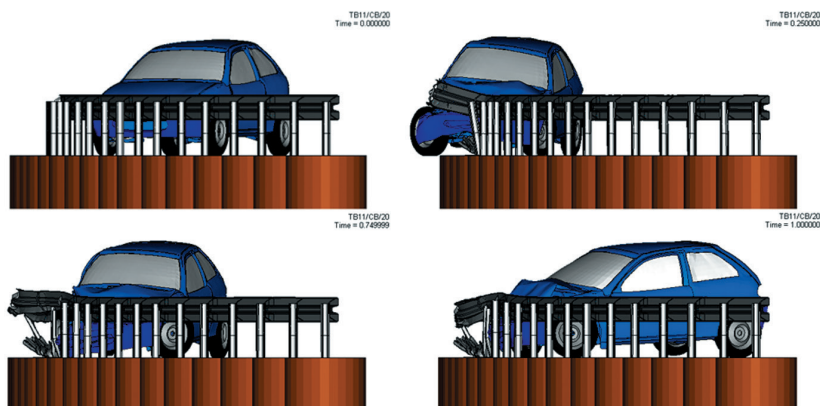
Rys. 14. Animacja testu zderzenia TB11/SBC/20 – widok z góry

Na rys. 19 porównano wykresy bilansu energetycznego dla testów zderzeniowych TB11/CB/20 i TB11/CBC/20, tzn. wykonanych w odniesieniu do bariery zakrzywionej bez nakładki i z nakładką CFR2. Wykresy te służą do kontroli poprawności modelowania i symulacji, a także do oceny redystrybucji energii kinetycznej, energii wewnętrznej i tarcia w wyniku

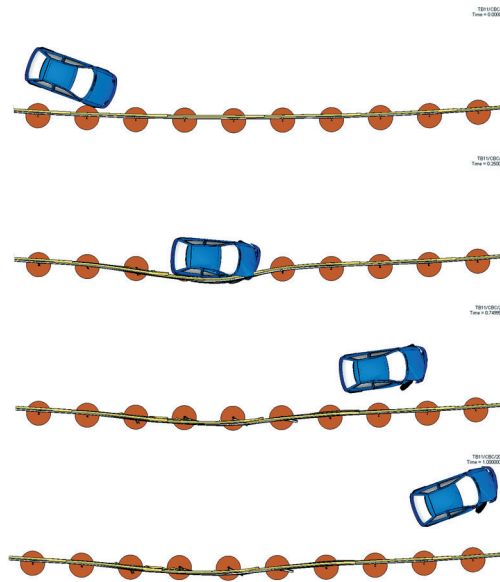
zastosowania nakładki CFR2. Energia wewnętrzna odpowiadająca zjawisku hourglass powinna być zbliżona do 0. Na rys. 20, 21 porównano przebiegi czasowe indeksu ASI dla bariery prostoliniowej bez i z nakładką CFR2 (rys. 20) oraz dla bariery zakrzywionej bez i z nakładką CFR2 (rys. 21). W tabeli 6 porównano przeprowadzone wirtualne testy zderzeniowe, zarówno jakościowo, jak i ilościowo, w tym parametry ASI, THIV, W, VCDI.



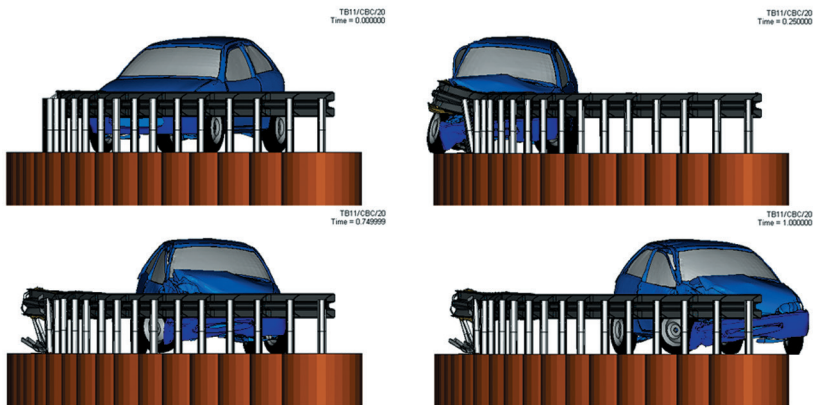
Rys. 15. Animacja testu zderzenia TB11/CB/20 – widok z góry



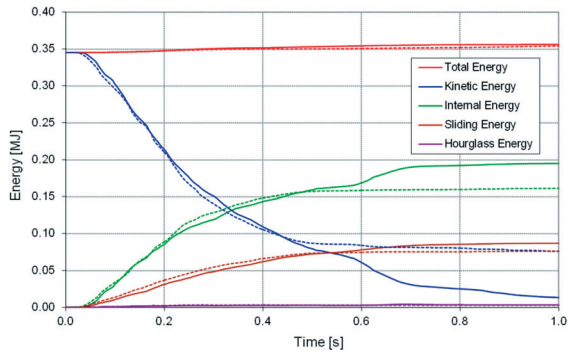
Rys. 16. Animacja testu zderzenia TB11/CB/20 – widok z przodu



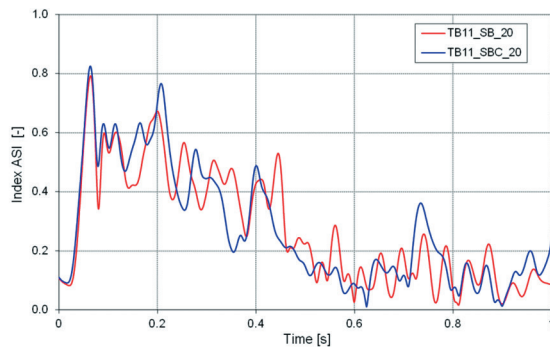
Rys. 17. Animacja testu zderzenia TB11/CBC/20 – widok z góry



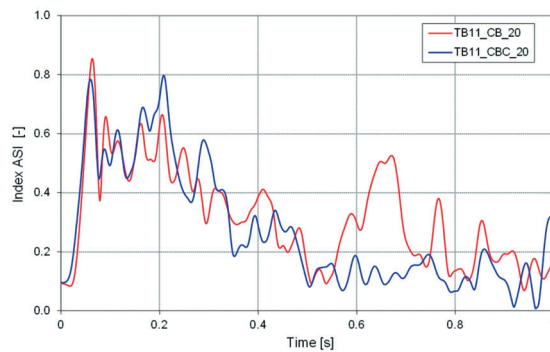
Rys. 18. Animacja testu zderzenia TB11/CBC/20 – widok z przodu



Rys. 19. Porównanie bilansów energetycznych dla testów zderzenia pojazdu z barierą w łuku: TB11/CB/20 – linie ciągłe; TB11/CBC/20 – linie przerywane



Rys. 20. Porównanie wykresów parametru ASI dla testów TB11/SB/20 i TB11/SBC/20



Rys. 21. Porównanie wykresów parametru ASI dla testów TB11/CB/20 i TB11/CBC/20

Tabela 6. Porównanie jakościowe i ilościowe wirtualnych testów zderzeniowych TB11

Test zderzeniowy	ASI [-]	THIV [km/h]	W [m]	VCDI	Zarzucenie pojazdu
TB11/SB/20	0,8 (0,79)	19 (18,90)	0,9 (0,87)	RF0010000	nie
TB11/SBC/20	0,8 (0,82)	21 (20,96)	0,8 (0,77)	RF0010000	nie
TB11/CB/20	0,9 (0,85)	21 (20,91)	0,8 (0,81)	RF0010000	tak
TB11/CBC/20	0,8 (0,80)	19 (19,21)	0,7 (0,72)	RF0010110	nie

Na podstawie przeprowadzonych symulacji sformułowano następujące główne wnioski:

- 1) Wpływ nakładki CFR2 na przebieg testu zderzeniowego TB11 w odniesieniu do bariery prostoliniowej jest mały. Odbicie pojazdu od bariery z nakładką jest nieznacznie zwiększone, ale kierowność pojazdu jest wyższa, co wynika z większego uszkodzenia przedniego zestawu kołowego w przypadku bariery niezmodyfikowanej (rys. 13, 14). Wartość indeksu ASI jest prawie taka sama w obydwu przypadkach (rys. 20).
- 2) Wpływ nakładki CFR2 na przebieg testu zderzeniowego TB11 w odniesieniu do bariery w łuku poziomym wklęsłym o promieniu 150 m jest znaczny (rys. 15–18, tabela 6). W przypadku bariery niezmodyfikowanej występuje niedopuszczalne zarzucenie pojazdu (rys. 15, 16). W pierwszej fazie testu bariery zmodyfikowanej (czas poniżej 0,45 s) występuje nieznaczna redukcja energii kinetycznej oraz nieznaczny wzrost energii wewnętrznej i tarcia w porównaniu z barierą niezmodyfikowaną (rys. 19). W dalszej części testu bariery zmodyfikowanej energia kinetyczna, energia wewnętrzna i tarcie utrzymują się na stałym poziomie, co gwarantuje przyjęcie testu zderzeniowego (rys. 19). Dokładna wartość indeksu ASI bariery zmodyfikowanej jest mniejsza o 6,5% w porównaniu z barierą zakrzywioną niezmodyfikowaną (rys. 21). Trajektoria ruchu i kierowność pojazdu są poprawne dla bariery zakrzywionej zmodyfikowanej (rys. 17, 18).
- 3) Krzywizna bariery niezmodyfikowanej SP-05/2 zwiększa znacząco energię absorbowaną, co prowadzi do zarzucenia pojazdu (rys. 19). Nakładka CFR2 połączona z barierą zakrzywioną eliminuje zarzucenie i zatrzymanie pojazdu oraz poprawia kierowność pojazdu po kolizji (rys. 15–18).

9. Podsumowanie

W pracy rozwinięto modelowanie numeryczne i symulację testów zderzeniowych: pojazd ruchomy – bariera drogowa. Metodologia modelowania numerycznego i symulacji opiera się na następujących elementach:

- zaawansowane modele materiałowe ze zniszczeniem części bariery i nakładki, złączy śrubowych, podłoża i pojazdu,
- ciśnienie w oponach, kontakt z tarciami, obciążenie grawitacyjne, potencjalna erozja elementów skończonych, kontrola hourglass w wymaganym zakresie,
- słupki stalowe zagłębione w odkształcalnym podłożu gruntowym,

- modelowanie bariery prostoliniowej i zakrzywionej z użyciem powłokowych elementów skończonych z całkowaniem zredukowanym,
- fizyczne modyfikacje modelu numerycznego pojazdu Suzuki Swift, pochodzącego z biblioteki publicznej NCAC, USA,
- wiarygodne wartości współczynników tarcia, bazujące na badaniach eksperymentalnych własnych,
- tłumienie wiskotyczne poszczególnych części układu (bariera, nakładka, podłoże).

Wirtualne testy zderzeniowe przeprowadzono w odniesieniu do bariery SP-05/2 klasy N2-W4-A w czterech przypadkach, tzn. bariera niezmodyfikowana / wyposażona w nakładkę CFR2, zlokalizowana na odcinku drogi prostoliniowym / w łuku poziomym o promieniu 150m. Badano wpływ krzywizny bariery oraz wyposażenia w nakładkę na przebieg testów zderzeniowych. Wykazano, że system nakładkowy CFR2 połączony z barierą drogową SP-05/2 w łuku o promieniu 150m eliminuje zarzucenie i zatrzymanie pojazdu oraz poprawia kierowalność pojazdu po kolizji.

Projektowanie nakładek na prowadnice zakrzywionych barier drogowych jest zagadnieniem złożonym, gdyż wymaga jednoczesnego spełnienia następujących warunków:

- 1) nakładka nie może być zbyt energochłonna, gdyż spowoduje zbyt duże pochłonięcie energii kinetycznej, co uniemożliwi wyprowadzenie pojazdu na jezdnię;
- 2) nakładka nie może być zbyt sztywna, gdyż spowoduje zbyt duże odbicie pojazdu na jezdnię,
- 3) nakładka nie może być zbyt słaba pod względem wytrzymałościowym, bo rozpadnie się w trakcie zderzenia,
- 4) złącza śrubowe nakładki z prowadnicą muszą zagwarantować integralność układu powstrzymującego podczas kolizji z pojazdem,
- 5) kształt nakładki musi zapewnić zachowanie cech eksploatacyjnych prowadnicy stałowej typu B,
- 6) parametry geometryczno-materiałowe nakładki muszą być tak dobrane, aby nakładka nie wchodziła w skrajnię drogową i zapewniała przyjęcie testu zderzeniowego.

Nakładka kompozytowo-pianowo-gumowa CFR2 na prowadnicę typu B skrajnej drogowej bariery ochronnej klasy N2-W4-A, ze słupkami w rozstawie 2,00 m, zastosowana na łukach dróg ruchu przyspieszonego o promieniu 140-220m zwiększa w odpowiednich proporcjach elastyczność, energochłonność i wytrzymałość bariery. W przypadku zderzenia pojazdu z barierą, zgodnie z badaniem TB11, nakładka CFR2 pozwala na spełnienie warunków nałożonych na parametry zderzenia. Nakładka CFR2 jest w pełni kompatybilna z aktualnie eksploatowanymi drogowymi barierami ochronnymi klasy N2-W4-A z prowadnicami typu B, m.in. SP-05/2, co obniża koszty jej wdrożenia. Szybki montaż za pomocą złączy śrubowych, z wykorzystaniem wolnych otworów w prowadnicy, nie powoduje utrudnień w ruchu drogowym.

Podziękowania

Praca została częściowo sfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju jako część projektu badawczego PBS1/B6/14/2012, realizowanego w latach 2013-2015. Autorzy wyrażają podziękowanie dr. inż. Pawłowi Dziwulskiemu (Wojskowa Akademia Techniczna) za konsultacje w zakresie modelowania oraz dr. inż. Cezaremu Senderowskiemu (Wojskowa Akademia Techniczna) za wyznaczenie współczynników tarcia.

Literatura

- [1] Alvarez M.: *Crash barrier protection element and crash barrier incorporating said protection element*, Patent application EP2426259A1, 2012-03-7.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Borovinssek M., Vesjenjak M., Ulbin M., Ren Z.: *Simulation of Crash Tests for High Containment Levels of Road Safety Barriers*, Engineering Failure Analysis 14 (2007) 1711-1718.
- [5] Bowyer S.: *Road safety barrier*, Patent US2007116513, 2007-05-24.
- [6] Conway S.J., Mauer F., Dallas J.: *Roadway Guardrail System*, Patent CA2697037, 2009-02-26.
- [7] Cucchietti M.: *Reinforced roadside barrier*, Patent EP1832681, 2007-09-12.
- [8] Dziwulski 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.
- [9] Dziwulski P.: *Badanie wybranych struktur do poprawy energochłonności drogowych barier ochronnych*, Praca doktorska, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2010.
- [10] EN 1317-1:2010. *Road restraint systems – Part 1: Terminology and general criteria for test methods*.
- [11] EN 1317-2:2010. *Road restraint systems – Part 2: Performance classes, impact tests acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets*.
- [12] Hallquist J. O.: *LS-DYNA Keyword User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, May 2007.
- [13] Hallquist H. J. O.: *LS-DYNA Theory Manual*, Livermore Software Technology Corporation, USA, March 2006.
- [14] Holecz F.: *Barriera protettiva dei margini autostradali e della zona spartitraffico*, Patent 432573, Switzerland, 20-08-1966.
- [15] Impero P.: *Road Safety Barrier*, Patent W02009090681, 2009-07-23.
- [16] Kiczko A., Niezgodą T., Nowak J., Dziwulski P.: *Numerical implementation of car impact into the modified road barrier*, J. Kones: Powertrain and Transport, 17, 3, 2010, pp. 189-196.
- [17] Klasztorny M., Niezgodą T., Romanowski R., Nycz D., Rudnik D., Zielonka K.: *Nakładka na prowadnicę bariery ochronnej na łuku drogi*, Zgłoszenie patentowe UP RP, 6.10.2014.
- [18] Klasztorny M., Kiczko A., Nycz D.: *Modelowanie numeryczne i symulacja rozciągania połączenia śrubowego segmentów prowadnicy B bariery drogowej*, 13. Konferencja Naukowo-Techniczna nt. Techniki Komputerowe w Inżynierii, Licheń Stary, 6-9 maja 2014, Materiały Konferencji, s. 77-78.
- [19] Kossakowski P.G.: *Simulation of Ductile Fracture of S235JR Steel Using Computational Cells with Microstructurally-Based Length Scales*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 50, 2, 2012, pp. 589-607.
- [20] Kwan C.H.: *Shock absorber for road safety barrier*, Patent AU2006235944, 2006-11-10.
- [21] Masinelli G., Piastra R.: *Method for making a protective device for guiderrails, and a protective de-vice for guiderrails*, Patent US7257875 B2, 2009-03-26.
- [22] Niezgodą T., Barnat W., Dziwulski P., Sławiński G., Kędzierski P.: *Smart panel*, Zgłoszenie patentowe PL 403165, 2013-03-15.

-
- [23] Patent 76P29467PL00. *Urządzenie pochłaniające energię zderzenia oraz zespół ochronny drogowy lub pojazdu zawierający co najmniej jedno urządzenie pochłaniające energię zderzenia.*
- [24] Rafferty J., Wallace H., Colquhoun T.: *Barrier Construction, Joining And Orientation System*, Patent W02009021290, 2009-02-19.
- [25] Ren Z., Vesenjak M.: *Computational and Experimental Crash Analysis of the Road Safety Barrier*, Engineering Failure Analysis 12 (2005) 963–973.
- [26] Tang J.: *Wave-shaped guiderail panel*, Patent WO 2013/107203 A1, 2012-10-30.
- [27] Wallace H., Colquhoun T., Hare H.J., Whiteside M.: *Improved Road Barrier*, Patent W02010105307, 2010-09-23.
- [28] http://metale.pwr.wroc.pl/files/A.Biegus-Polaczenia_Srubowe.pdf. Biegus A.: *Projektowanie konstrukcji stalowych według Eurokodu 3; Część 4 - połączenia śrubowe*; Materiały dydaktyczne, 07.04.2013.
- [29] <http://www.salzgitter-mannesmann.pl/>. *Systems, Service, Steel*, Salzgitter, January 7, 2013.
- [30] <http://hpwizard.com/tire-friction-coefficient.html>. *Tire friction and rolling resistance coefficients*, TA-Technix Coilover Kits, Denmark, January 7, 2013.
- [31] <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>. *Vehicle Models*, National Crash Analysis Center, USA, January 7, 2013.