

WYKORZYSTANIE METOD ENERGETYCZNYCH W OBLICZENIACH PRĘDKOŚCI ZDERZENIA SAMOCHODU

ANDRZEJ ŻUCHOWSKI¹

Wojskowa Akademia Techniczna

Streszczenie

W pracy rozważono relacje pomiędzy deformacją czołowej strefy zgniotu samochodów a prędkością uderzenia w barierę. Do opracowania parametrów modeli energetycznych, stosowanych w analizie zderzeń samochodów, wykorzystano wyniki 18 testów zderzeniowych z udziałem trzech modeli samochodów. Testy zderzeniowe dotyczyły czołowego uderzenia samochodu w barierę, przy wartościach prędkości 40, 48 i 56 km/h. Bezpośrednie wyniki pomiarów, z analizowanych w tej pracy testów zderzeniowych, pobrano w postaci cyfrowej z [26]. Uzyskane wartości parametrów modeli energetycznych odniesiono do wartości podawanych w literaturze. Uwagę zwrócono na modelach liniowych, stosowanych w metodach uproszczonej, Campbella i McHenry'ego, oceniając ich skuteczność w zastosowaniu do współczesnych samochodów. Metody te bazują na wymiarach deformacji strefy zgniotu. Ustalono, że sposób określenia deformacji samochodu, spowodowanej uderzeniem w przeszkodę, może wpływać na wyniki obliczeń prędkości zderzenia. Na podstawie wyników z kilkuset testów zderzeniowych pokazano relacje pomiędzy prędkością uderzania w barierę a deformacją czołowej strefy zgniotu samochodów, należących do różnych kategorii. Wskazano, że właściwości czołowej strefy zgniotu współczesnych samochodów są inne niż samochodów sprzed 20-30 lat. Tym samym wartości parametrów do metod energetycznych, stosowanych w procesie rekonstrukcji wypadku drogowego, muszą uwzględniać zmiany wprowadzone w konstrukcji samochodów.

Słowa kluczowe: zderzenie czołowe, rekonstrukcja wypadku drogowego, metody energetyczne, deformacja nadwozia

1. Wprowadzenie

W procesie rekonstrukcji wypadku drogowego kluczowym zagadnieniem jest często ustalenie prędkości początkowej samochodu w fazie przed zderzeniowej. Zastosowanie w tym celu danych z samochodowych „czarnych skrzynek” (*Accident Data Recorder, Event Data Recorder, Unfall Daten Speicher*) będzie w przyszłości poważnym ułatwieniem w tym zakresie. Obecnie nadal mogą być wykorzystywane metody obliczeniowe, w których uwzględniane są relacje pomiędzy prędkością samochodu w chwili rozpoczęcia

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Faculty of Mechanical Engineering, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: azuchowski@wat.edu.pl, tel. 22 261 837 454

deformacji nadwozia a energią potrzebną do spowodowania tej deformacji. Zależności takie opisywane są za pomocą modeli matematycznych, nazywanych modelami lub metodami energetycznymi. Istotnym problemem w stosowaniu modeli energetycznych jest ograniczona dostępność ich parametrów dla współczesnych samochodów. Natomiast wykorzystywanie w obliczeniach niewłaściwych danych może prowadzić do błędnego oszacowania prędkości zderzenia a w następstwie do przygotowania błędnej opinii.

Metody energetyczne w rekonstrukcji wypadków drogowych bazują na pomiarach deformacji samochodu, jakiej uległ podczas uderzenia w przeszkodę. Rozmiar tej deformacji zależy od prędkości uderzenia, sztywności samochodu w miejscu kontaktu oraz od właściwości przeszkody. Istotna jest tu także masa samochodu oraz konstrukcja nadwozia, doskonalona w kolejnych generacjach samochodu [14]. Sztywność czołowej strefy zgniotu zależy nie tylko od konstrukcji nadwozia, ale także od rozmieszczenia zespołów układu napędowego oraz osprzętu silnika w komorze silnikowej.

Celem pracy jest ocena wyników obliczeń prędkości przed zderzeniowej samochodu, prowadzonych przy zastosowaniu metod energetycznych, w których zakłada się liniową zależność pomiędzy prędkością (lub siłą zgniatającą nadwozie) a deformacją samochodu. Ich opis i przykłady zastosowania podano m.in. w pracach [1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 18, 20, 24]. W analizie uwzględniono metodę uproszczoną oraz metody Campbella i McHenry'ego, stosowane m.in. w programie PC Crash.

Uwagę skupiono na czołowym uderzeniu samochodu w przeszkodę. Skuteczność metod energetycznych oceniono poprzez porównanie znanej wartości prędkości uderzenia samochodu w barierę sztywną, z wartością prędkości wyznaczoną za pomocą metod energetycznych. Szukano odpowiedzi na pytania: czy zmiany w konstrukcji samochodów w istotny sposób wpłynęły na wartości parametrów stosowanych w metodach energetycznych oraz która z analizowanych metod daje najlepsze wyniki?

Na podstawie wyników testów zderzeniowych, udostępnionych w Internecie przez *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) [26], pokazano relacje pomiędzy prędkością uderzania w barierę a deformacją czołowej strefy zgniotu kilkuset samochodów, należących do różnych kategorii. Szczegółowej analizie poddano wyniki badań trzech modeli samochodów, zwracając uwagę na opis ich deformacji oraz na charakterystykę sztywności czołowej strefy zgniotu. Wyniki badań i obliczeń wykorzystano do opracowania parametrów modeli energetycznych dla tych trzech samochodów i porównano je z dostępnymi w literaturze. Wskazano na rozrzut wyników pomiarów, uzyskiwanych w testach zderzeniowych prowadzonych w tych samych warunkach badań.

2. Obiekty badań

Relacje pomiędzy prędkością uderzania w barierę a deformacją czołowej strefy zgniotu samochodów oceniono na podstawie wyników badań trzech modeli samochodów. Wybór samochodów do analizy uwzględniał następujące kryteria:

- zderzenie z barierą sztywną, usytuowaną prostopadle do kierunku ruchu samochodu;

- samochody z różnych sektorów handlowych (kategorii), produkowane w podobnych latach;
- ten sam model samochodu, badany przy trzech wartościach prędkości zderzenia 40, 48, 56 km/h;
- co najmniej dwa testy tego samego modelu samochodu przy danej prędkości uderzenia w barierę.

Wiele uwagi poświęcono identyfikacji samochodów, prowadzonej w celu ustalenia podobieństwa poszczególnych egzemplarzy danego modelu samochodu. Podobieństwo to ustalono uwzględniając: typ nadwozia, rok produkcji, pojemność oraz sposób ustawienia silnika (poprzeczny, wzdluzny), rodzaj skrzyni biegów (manualna, automatyczna), napędzane koła (przednie, tylne), masa, wymiary (w tym rozmiar opon) oraz numer VIN. Ważnym etapem w ocenie podobieństwa samochodów było porównanie przebiegów charakterystyk sztywności, które opisano w punkcie 4 (rys.5). Na rysunku 1 pokazano fotografie modeli samochodów, które uwzględniono w dalszej analizie. Łącznie rozważono wyniki 18 testów zderzeniowych. Ogólną charakterystykę samochodów podano w tabeli 1. Samochody Honda Accord różniły się rodzajem skrzyni biegów (manualna, automatyczna) a w Fordzie Escape napędzane były tylko przednie koła lub wszystkie.



Rys. 1. Samochody uwzględnione w analizie [26]

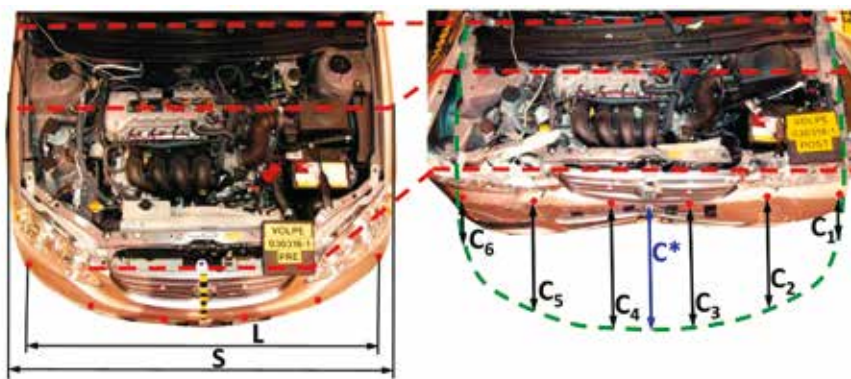
Tabela 1. Charakterystyka samochodów (na podstawie [26])

Marka, model, rocznik i typ nadwozia	Układ napędowy	Masa [kg]	Długość [m]	Szerokość [m]	Rozmiar opon
Toyota Echo, 2001, sedan	Silnik 1,5 dm ³ , 4-cylindrowy rzędowy, ustawiony poprzecznie, napędzane koła przednie, automatyczna skrzynia biegów	1099 – 1158	4,13	1,66	P175/65/R14
Honda Accord, 2001, sedan	Silnik 2,3 dm ³ , 4-cylindrowy rzędowy, ustawiony poprzecznie, napędzane koła przednie, automatyczna lub manualna skrzynia biegów	1500 – 1597	4,78	1,78	P195/65/R15
Ford Escape, 2001, SUV	Silnik 3 dm ³ , 6-cylindrowy widlasty, ustawiony poprzecznie, napędzane koła przednie lub 4x4, automatyczna skrzynia biegów	1733 – 1797	4,36	1,74	P235/70/R16

3. Analiza wyników pomiarów deformacji samochodów

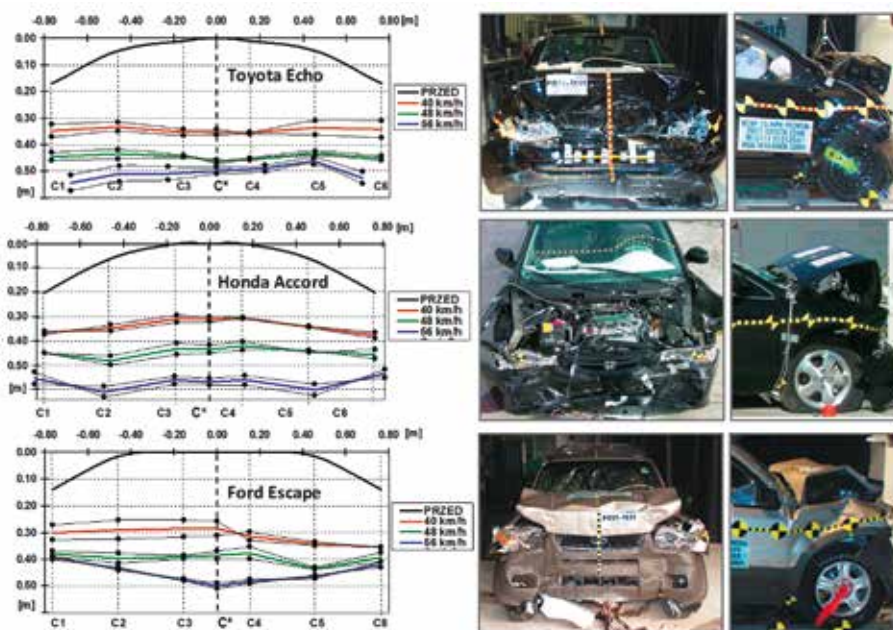
W celu określenia deformacji samochodu podczas testu zderzeniowego wykonuje się pomiary wymiarów nadwozia przed i po zderzeniu z barierą. Na rysunku 2 pokazano zwymiarowaną deformację samochodu za pomocą odległości $C_1, C_2, \dots, C_6$, równomiernie rozmieszczonych na odcinku L , który jest zwykle krótszy niż szerokość samochodu S . Wymiar C^* oznacza głębokość deformacji mierzonej na wysokości zderzaka, w połowie jego szerokości (w pionowej wzdłużnej płaszczyźnie samochodu).

Wyniki pomiarów deformacji samochodów przy trzech wartościach prędkości uderzenia w barierę pokazano na rysunku 3. Początkowy zarys nadwozia zaznaczono liniami oznaczonymi „PRZED”. Cienkie, czarne linie obrazują deformację samochodów w kolejnych testach (po dwa testy przy danej prędkości). Różnice wartości głębokości deformacji w niektórych miejscach są dość znaczne, lecz nie przekraczają $6 \div 7$ cm. Z każdych dwóch testów przy danej prędkości wyznaczono uśrednione linie deformacji, które na wykresach opisano wartością prędkości zderzenia.



Rys. 2. Deformacja samochodu po uderzeniu w sztywną barierę (wykorzystano fotografie z [26])

Charakterystyczne tu jest, że strefa zgniotu samochodu po uderzeniu w sztywną, płaską barierę nie jest odkształcona równomiernie na całej szerokości. Jest to skutek sprężystych oddziaływań pomiędzy zespołami samochodu rozmieszczonymi w komorze silnikowej a elementami nadwozia. Przykładowo w samochodzie Ford Escape, przy prędkości 56 km/h, środkowa część strefy zgniotu jest znacznie bardziej odkształcona niż jej boczne obszary. W tym przypadku może to być spowodowane oddziaływaniem kół na deformowane elementy przedniego pasa nadwozia. W Hondzie Accord, przy prędkości 56 km/h, w miejscach wymiarów C_2 i C_5 mamy wyraźnie większą deformację, niż w innych. Można to zinterpretować następująco: miejsca C_1, C_3, C_4 i C_6 mogły być podczas kontaktu z barierą odkształcone podobnie jak C_2 i C_5 , jednak po odbiciu samochodu od bariery, wskutek sprężystych naprężeń w konstrukcji, zostały wypchnięte do przodu. Deformacja Toyoty Echo przy prędkości 56 km/h jest większa po lewej stronie samochodu (miejscach C_1, C_2, C_3). Taki efekt może być skutkiem różnej sztywności strefy zgniotu po lewej



Rys. 3. Deformacja samochodów Toyota Echo, Honda Accord i Ford Escape
(fotografie przedstawiają samochody po uderzeniu w barierę przy prędkości 56 km/h [26])

i prawej stronie komory silnikowej (np. wpływ niesymetrycznego rozmieszczenia zespołów), co może niekiedy powodować niewielki obrót samochodu podczas prostopadłego uderzenia w płaską barierę [12].

Stosowanie liniowych modeli energetycznych wymaga przyjęcia do obliczeń deformacji, wyrażonej za pomocą jednej liczby. Zasadniczym problemem jest to, w jaki sposób przestrzenną deformację samochodu opisać jedną liczbą? Praktyczne zastosowanie w wymiarowaniu deformacji samochodu, zwłaszcza częściowej (nie na całej szerokości), ma tzw. deformacja średnia, obliczana na podstawie wymiarów $C_1 \dots C_6$ [10, 11, 21, 22]:

$$C_{sr} = \frac{1}{5} \left(\frac{C_1}{2} + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + \frac{C_6}{2} \right) \quad (1)$$

Do opisu deformacji samochodu, który uderzył czołowo w sztywną, płaską barierę można rozważyć wykorzystanie opisanej wcześniej deformacji C^* lub deformacji maksymalnej C_{max} , która jest odległością dwóch pionowych płaszczyzn, prostopadłych do osi wzłużnej samochodu, z czego jedna przechodzi przez najdalej do przodu wysunięty punkt nadwozia przed uderzeniem w barierę, a druga przez najdalej do tyłu wysunięty punkt zdeformowanej strefy zgniotu. Gdyby rzut zdeformowanego obszaru na płaszczyznę podłoża miał kształt zbliżony do prostokąta, to $C_{sr} \approx C^* \approx C_{max}$. Deformacja C_{max} nie ma praktycznego zastosowania w rekonstrukcji wypadku drogowego, natomiast uwzględniono ją do pokazania relacji pomiędzy deformacją plastyczną (nazywaną także statyczną lub trwałą) i deformacją dynamiczną, opisaną w dalszej części pracy.

Na podstawie uśrednionych linii deformacji samochodów obliczono wartości deformacji C_{max} , C^* oraz C_{sr} . Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2. Wynikają z nich następujące zależności

$$C_{sr} = (0,81...0,97) \cdot C^* \text{ and } C_{max} = (1,00...1,24) \cdot C^* \quad (2)$$

Tabela 2. Deformacja samochodów w zależności od prędkości uderzenia samochodu w barierę

Samochód	V [km/h]	C_{max} [m]	C^* [m]	C_{sr} [m]	L [m]	S [m]
Toyota Echo	56	0,564	0,498	0,446	1,347	1,66
	48	0,463	0,463	0,386	1,525	
	40	0,357	0,354	0,288		
Honda Accord	56	0,610	0,569	0,506	1,636	1,78
	48	0,481	0,434	0,381	1,525	
	40	0,377	0,311	0,270		
Ford Escape	56	0,500	0,500	0,420	1,515	1,74
	48	0,436	0,385	0,364	1,525	
	40	0,356	0,286	0,278		

W tabeli 2 podano także wartości szerokości samochodów S oraz odcinka L (uśrednionej z dwóch pomiarów), która jest rozstawem punktów, gdzie mierzone są deformacje C_i i C_6 (por. rys. 2). Odległość L stanowi tu 81÷92% szerokości samochodów i opisywana jest w raportach z badań [26] (także w programie PC Crash, metoda CRASH3) jako szerokość deformacji nadwozia, co jest wątpliwe. Mianowicie w testach przy prędkości 40 i 48 km/h dla każdego samochodu mamy $L=1,525$ m, niezależnie od jego szerokości (testy te prowadzono w tym samym laboratorium). W samochodach Toyota Echo i Ford Escape długość odcinka L przy prędkości zderzenia 56 km/h (testy prowadzone w innych laboratoriach) jest mniejsza, niż przy prędkości 40 i 48 km/h. Ponadto miejsca pomiarów deformacji $C_1...C_6$ były określane w różny sposób podczas badań samochodów, np. w Toyocie Echo przy prędkości 40 i 48 km/h odcinek L jest podzielony na 5 równych części a przy prędkości 56 km/h na 6 (por. rys.3). Ponieważ są wątpliwości, czy odcinek L poprawnie opisuje szerokość deformacji, to w dalej prowadzonej analizie przyjęto, że jest ona równa szerokości samochodu S .

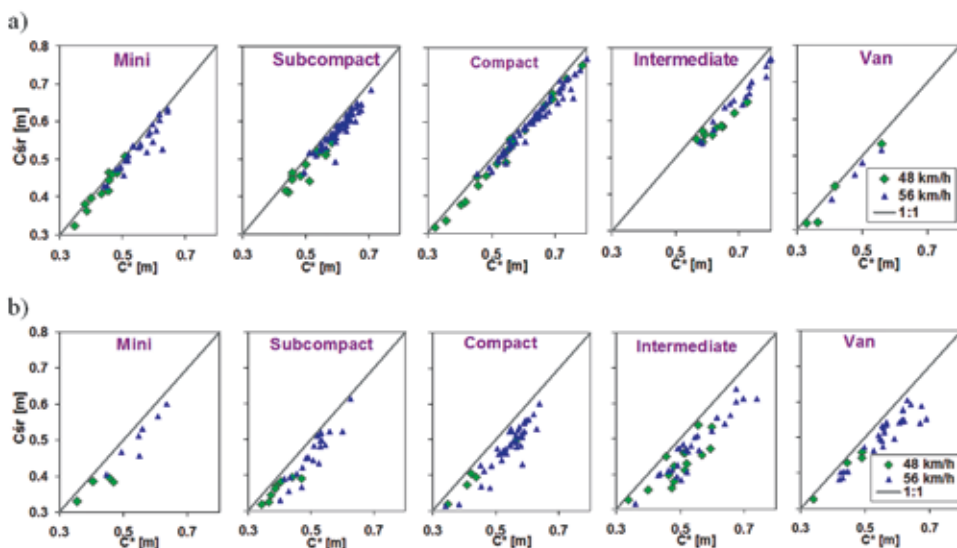
Relacje pomiędzy C^* oraz C_{sr} określono na podstawie wyników badań 448 samochodów, przy prędkości 48 i 56 km/h [26]. Samochody podzielono na kategorie wg klasyfikacji amerykańskiej, którą wykorzystano także w podręczniku [11]. Ujęto w niej samochody z nadwoziem typu coupe, sedan, hatchback i kombi oraz vany (pominięto pickup, SUV). W tabeli 3 podano charakterystykę masowo-wymiarową samochodów zaliczonych do danej kategorii oraz relacje pomiędzy C^* oraz C_{sr} . Na wykresach z rysunku 4 porównano wartości C_{sr} i C^* samochodów różnych kategorii.

W przypadku samochodów produkowanych w latach 1974-1989 mamy wyraźnie mniejsze różnice pomiędzy wartościami C_{sr} i C^* (por. odległość punktów na wykresach od linii „1:1”).

Tabela 3. Zależność pomiędzy deformacją C_{sr} i C^* samochodów różnych kategorii (testy przy prędkości 48 i 56 km/h)

Kategoria	Liczba samochodów	Masa [kg]	Rozstaw osi [m]	Długość [m]	Szerokość [m]	Samochody z lat 1974-1989	Samochody z lat 1994-2013
Mini (M)	53	900...1180	2,14...2,54	3,50...4,43	1,34...1,70	$C_{sr}=(0,84...1,01) \cdot C^*$	$C_{sr}=(0,82...0,99) \cdot C^*$
Subcompact (S)	96	1260...1450	2,32...2,67	3,94...4,08	1,67...1,80	$C_{sr}=(0,83...1,01) \cdot C^*$	$C_{sr}=(0,78...0,98) \cdot C^*$
Compact (C)	148	1480...1730	2,62...2,81	4,70...5,15	1,75...1,88	$C_{sr}=(0,87...1,01) \cdot C^*$	$C_{sr}=(0,74...0,97) \cdot C^*$
Intermediate (I)	111	1800...2200	2,79...3,08	4,83...5,51	1,80...1,90	$C_{sr}=(0,91...0,99) \cdot C^*$	$C_{sr}=(0,76...0,99) \cdot C^*$
Van (V)	40	1780...2270	2,46...3,18	4,43...5,18	1,74...2,01	$C_{sr}=(0,88...1,00) \cdot C^*$	$C_{sr}=(0,80...0,96) \cdot C^*$

Może to wynikać z innego zarysu przedniej części nadwozia, która w starszych konstrukcjach samochodów była zbliżona do prostokąta. Na rysunku 4 widoczna jest także inna ważna informacja, mianowicie wartości deformacji we współczesnych samochodach są wyraźnie mniejsze niż w samochodach z lat 1974-1989 (zwłaszcza w samochodach kategorii subcompact, compact oraz intermediate). Więcej informacji o zależnościach pomiędzy deformacją samochodów a ich masą i rokiem produkcji podano w pracy [14].

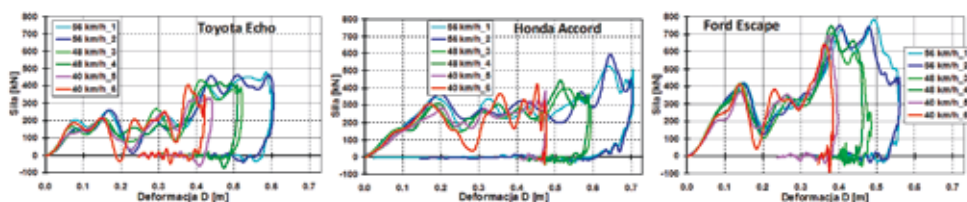


Rys. 4. Zależność pomiędzy deformacją C_{sr} i C^* samochodów z różnych kategorii (prędkość zderzenia 48 i 56 km/h) a) samochody z lat 1974-1989 (n=230), b) samochody z lat 1994-2013 (n=218)

4. Analiza charakterystyki sztywności samochodów

Ważne informacje o przebiegu procesu zderzenia samochodu zawiera tzw. charakterystyka sztywności czołowej strefy zgniotu. Przedstawia ona zmiany siły zgniatającej nadwozie w funkcji jego deformacji całkowitej, to znaczy deformacji plastycznej i sprężystej, która dalej nazywana będzie *deformacją dynamiczną* (D). Charakterystykę sztywności sporządza się najczęściej na podstawie pomierzonego przyspieszenia samochodu, podczas jego uderzeniu w płaską, sztywną barierę. Sposób przygotowania takiej charakterystyki opisano w pracach [15, 25]. Siła zgniatająca nadwozie może być mierzona także za pomocą czujników umieszczonych w barierze [5, 12, 13, 25]. Charakterystyki sztywności na rysunku 5 przygotowano na podstawie realizacji przyspieszenia samochodu podczas zderzenia. Przyspieszenie samochodu mierzone jest w kilku punktach, a do obliczeń przyjęto w tej pracy uśredniony jego przebieg, wykorzystując bezpośrednie wyniki pomiarów z [26]. Ważnymi czynnościami podczas obróbki wyników pomiarów, wpływającymi na przebieg opracowanych charakterystyk sztywności, jest centrowanie oraz filtrowanie przebiegów. Do filtracji przebiegów zastosowano filtr CFC60.

W analizie uwzględniono po dwa testy zderzeniowe każdego modelu samochodu przy danej prędkości uderzenia w barierę i uzyskano znaczne podobieństwo przebiegów, mimo że wykorzystywane w testach zderzeniowych egzemplarze samochodów Honda Accord i Ford Escape różniły się konstrukcją układu napędowego (tabela 1). Warto tu zwrócić uwagę, że układ pomiarowy rejestruje podczas zderzenia przyspieszenie samochodu w miejscach, gdzie umieszczone są czujniki. Dlatego chwilowe zmiany przyspieszenia, mogą być skutkiem lokalnych drgań konstrukcji nadwozia. Przykładowo na przebiegu charakterystyki sztywności Toyoty Echo (40 km/h) mamy ujemną wartość siły, przy deformacji około 0,2 m.



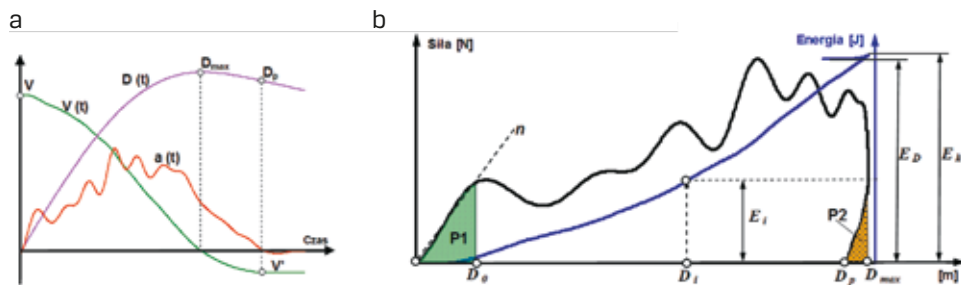
Rys. 5. Charakterystyki sztywności samochodów Toyota Echo, Honda Accord i Ford Escape

Charakterystyki sztywności Toyoty Echo i Forda Escape charakteryzują się szybkim narastaniem siły zgniatającej nadwozie już przy deformacji powyżej 0,3 m. W Hondzie Accord ma to miejsce dopiero przy deformacji około 0,6 m, co potwierdza różnice w konstrukcji czołowej strefy zgniotu tych samochodów.

Poniżej uwagę zwrócono na przyczyny różnic pomiędzy deformacją plastyczną C a deformacją dynamiczną D . W tym celu charakterystyczne wielkości opisujące ruch samochodu podczas zderzenia oraz wielkości opisujące charakterystykę sztywności czołowej strefy zgniotu, podano na rysunku 6. Są to:

- deformacja sprężysta D_0 na początku zginiatania nadwozia;

- deformacja sprężysto-plastyczna D_p , (nazywana niekiedy deformacją separacji [19]), występująca w chwili oddzielenia samochodu od przeszkody, gdy $F_z=0$;
- maksymalna deformacja sprężysto-plastyczna D_{max} ;
- odcinek $(D_{max} - D_p)$, który reprezentuje resztkową deformację sprężystą [11].



Rys. 6. Charakterystyczne wielkości opisujące ruchu samochodu podczas zderzenia (a) oraz charakterystyka sztywności czołowej strefy zgniotu (b)

Uwzględniając, że początek przebiegu charakterystyki sztywności jest prawie liniowy (prosta n na rys. 6b) założono, że przemieszczenie D_0 oznacza deformację sprężystą, która występuje przy niewielkiej prędkości uderzenia w barierę (por. współczynnik $b0$ w metodzie Campbella, opisanej w pkt. 6). Wartości D_0 , D_p i D_{max} odczytano bezpośrednio z charakterystyki sztywności, przy czym D_0 odczytano z charakterystyki dotyczącej prędkości 40 km/h, gdzie początek deformacji plastycznej jest najlepiej widoczny. W tabeli 4 porównano wartości deformacji dynamicznej D_{max} i D_p z wartościami deformacji plastycznej C_{max} i C^* z tabeli 2, przy czym

$$\gamma_1 = \frac{D_{max}}{C^*}, \quad \gamma_2 = \frac{D_p}{C^*}, \quad \text{and} \quad \gamma_3 = \frac{D_p}{C_{max}} \quad (3)$$

Tabela 4. Porównanie deformacji plastycznej i dynamicznej samochodów

Samochód	V [km/h]	D_0 [m]	D_p [m]	D_{max} [m]	γ_1	γ_2	γ_3
Toyota Echo	56	0,06	0,568	0,602	1,21	1,14	1,01
	48		0,490	0,515	1,11	1,06	1,06
	40		0,400	0,432	1,22	1,13	1,12
Honda Accord	56	0,09	0,610	0,704	1,24	1,07	1,00
	48		0,565	0,591	1,36	1,30	1,17
	40		0,469	0,477	1,53	1,51	1,24
Ford Escape	56	0,07	0,520	0,559	1,12	1,04	1,04
	48		0,455	0,475	1,23	1,18	1,04
	40		0,380	0,390	1,36	1,33	1,07

Wartości wskaźników γ obrazują różnice pomiędzy deformacją dynamiczną i plastyczną. Największe różnice występują w samochodzie Honda Accord, gdzie np. $\gamma_i = 1,24 \div 1,53$. Przy prędkości 56 km/h deformacja sprężysto-plastyczna D_p ma wartość zbliżoną do deformacji C_{max} we wszystkich samochodach. Różnice pomiędzy deformacją plastyczną i dynamiczną samochodów z lat 2005-2007 opisano w pracy [23].

Zależność pomiędzy prędkością zderzenia a deformacją dynamiczną można ustalić uwzględniając rozproszoną podczas zderzenia energię. Na podstawie przebiegu charakterystyki sztywności można obliczyć energię, odpowiadającą danej deformacji D_i :

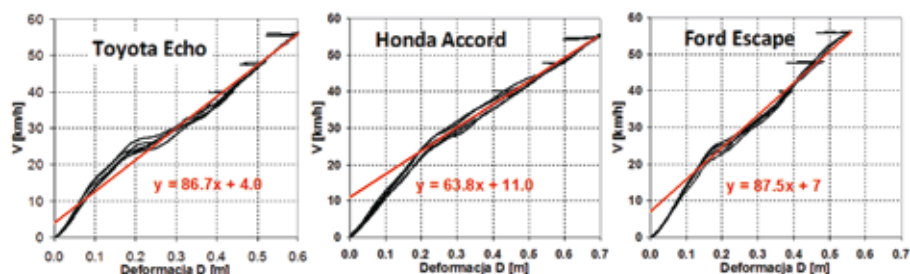
$$E_i = \int_0^{D_i} F_z dD \quad (4)$$

gdzie: F_z – siła zgniatająca nadwozie, D – deformacja dynamiczna.

Wartość prędkości V_i , przy której występuje deformacja D_i jest wówczas:

$$V_i = \sqrt{\frac{2E_i}{m}} \quad (5)$$

Wyniki obliczeń prędkości zderzenia wg (5) przedstawiono na rysunku 7. Ich bezpośrednie wykorzystanie podczas rekonstrukcji wypadku nie jest możliwe, ponieważ deformacja plastyczna (mierzona na powypadkowym samochodzie) i dynamiczna (określana na podstawie charakterystyki sztywności) mogą się znacznie różnić [5, 15, 23], co pokazano wcześniej w tabeli 4. Wyniki z rysunku 7 mogą być przydatne w tych modelach samochodów, które uwzględniają dynamikę procesu zderzenia.



Rys. 7. Skorzenie prędkości samochodu i deformacji dynamicznej

Na rysunku 6b zaznaczono także:

- pole P_1 , obrazujące energię E_0 deformacji sprężystej na początku zgniatania nadwozia;
- pole P_2 , obrazujące energię E' odbicia samochodu od bariery.

Maksymalna wartość całki (4) jest równa energii kinetycznej samochodu E_k w chwili uderzenia w barierę. Jest ona podczas zderzenia przekształcana głównie na energię deformacji plastycznej E_p . Po osiągnięciu deformacji D_{max} energia obliczona z zależności (4) maleje

do wartości E_D (rys.6). Uwzględniając powyższe, z bilansu energii wynikają następujące zależności:

$$E_k = \int_0^{D_{\max}} F_z dD = (E_0 + E_p) + E = E_D + E \quad (6)$$

$$E_D = E_k - E = 0,5m(V^2 - V'^2) \quad (7)$$

gdzie: m – masa samochodu, V – prędkość uderzenia w barierę, V' – prędkość odbicia.

Zależność (7) niekiedy przedstawiana jest w postaci:

$$E_k = E_D + E = 0,5m(V_D^2 - V'^2) \quad (8)$$

a prędkość

$$V_D = EES = \sqrt{\frac{2E_D}{m}} \quad (9)$$

nazywana jest prędkością równoważną energii (EES, *Energy Equivalent Speed*) [11]. Warto zwrócić uwagę, że gdyby $V' = 0$ to $V_D = V$ oraz $E_D = E_k$.

W podobny sposób można obliczyć graniczną prędkość V_0 , przy której występuje tylko deformacja sprężysta D_0 :

$$V_0 = \sqrt{\frac{2E_0}{m}} \quad (10)$$

Część energii kinetycznej samochodu przekształcana jest na energię odbicia E' , która jest skutkiem resztkowej deformacji sprężystej [11]. Wartość prędkości odbicia V' można od- czytać z przebiegu prędkości w funkcji czasu (otrzymujemy go po scałkowaniu realizacji przyspieszenia, por. rys. 6) lub obliczyć z zależności

$$V' = \sqrt{\frac{2E'}{m}} \quad (11)$$

Prędkość odbicia V' może być wyrażona za pomocą współczynnika restytucji k_{res} . W przypadku zderzenia samochodu ze sztywną barierą mamy

$$V' = -k_{res} \cdot V \quad (12)$$

Wyniki obliczeń opisanych powyżej wielkości zestawiono w tabeli 5. Zasadniczym ustale- niem jest to, że energia deformacji E_D stanowi 95,1...99,8% energii kinetycznej E_k a prę- dkość V_D stanowi ponad 98% prędkości początkowej V , czyli przyjęcie $V_D = V$ oznacza, że błąd obliczeń nie przekracza 2%. Poniżej zapisano kilka innych istotnych wniosków:

- wartości prędkość V_0 są około 8÷11 km/h;
- wartości prędkości odbicia V' samochodów Toyota Echo i Ford Escape są w granicach 4÷9 km/h, przy czym większe wartości obserwuje się przy większej prędkości uderze- nia w barierę;

- wartości współczynnika restytucji samochodów Toyota Echo i Ford Escape zawierają się w granicach odpowiednio $0,090 \div 0,133$ oraz $0,147 \div 0,167$, przy czym nie zależą one od prędkości uderzenia w barierę;
- wartości współczynnika restytucji samochodu Honda Accord są w dość szerokim przedziale $0,046 \div 0,221$ i silnie zależą od prędkości uderzenia w barierę (największe wartości wystąpiły przy prędkości 56 km/h, gdzie prędkość odbicia była około 11-12 km/h).

Tabela 5. Zestawienie wyników obliczeń energii, prędkości i współczynnika restytucji

Samochód	V [km/h]	$Mass$ [kg]	E_k [kJ]	E_θ [kJ]	V_θ [km/h]	E_D [kJ]	V_D [km/h]	E' [kJ]	V' [km/h]	k_{res}
Toyota Echo	56,5	1138	140,1	3,8	9,3	137,3	55,9	2,9	8,3	0,147
	56,3	1136	138,9	2,6	7,7	135,4	55,6	3,5	9,0	0,160
	48,5	1142	103,6	3,9	9,4	101,2	48,0	2,4	7,0	0,144
	47,8	1158	102,1	2,8	7,9	99,9	47,3	2,2	7,1	0,148
	40,3	1147	71,9	3,1	8,4	70,1	39,7	1,8	6,6	0,165
	40,5	1099	69,5	3,7	9,3	67,8	39,9	1,7	6,7	0,167
Honda Accord	55,6	1597	190,6	7,4	11,0	181,3	54,2	9,3	12,3	0,221
	55,7	1589	190,2	6,8	10,5	183,2	54,7	7,0	10,7	0,192
	48,1	1520	135,7	8,3	11,9	134,3	47,9	1,4	4,8	0,101
	47,9	1555	137,6	5,8	9,8	135,6	47,6	2,1	5,8	0,120
	40,2	1556	97,0	5,8	9,8	96,2	40,0	0,8	4,1	0,103
	40,2	1500	93,5	7,0	11,0	93,3	40,2	0,2	1,8	0,046
Ford Escape	56,3	1794	219,4	6,8	9,9	216,8	56,0	2,6	6,1	0,108
	56,3	1740	212,8	6,4	9,8	209,2	55,8	3,6	7,5	0,133
	48,2	1781	159,6	7,1	10,2	158,3	48,0	1,3	4,3	0,090
	47,8	1796	158,3	6,6	9,8	157,1	47,6	1,2	4,5	0,094
	40,0	1797	110,9	5,8	9,1	109,4	39,7	1,5	4,6	0,115
	40,1	1733	107,5	6,5	9,9	106,5	39,9	1,0	4,0	0,099

5. Metoda uproszczona

W metodzie uproszczonej zakłada się, że siła powodująca deformację samochodu jest proporcjonalna do głębokości tej deformacji. Praca deformacji E_D definiowana jest przy wykorzystaniu współczynnika sztywności k^* , który odniesiony jest do powierzchni deformacji [3, 9, 10, 11]:

$$E_D = 0,5 \cdot w_D \cdot h \cdot C^2 \cdot k^* \quad [J] \quad (13)$$

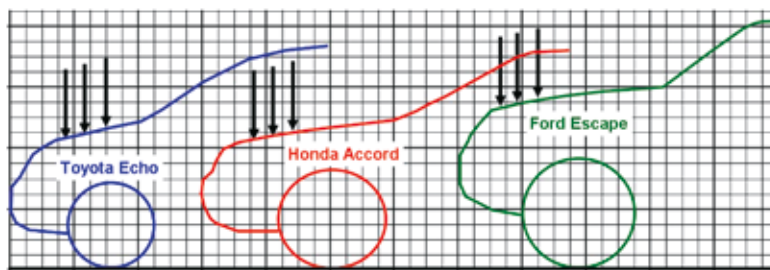
gdzie: w_D, h – uśredniona szerokość i wysokość deformacji [m]; C – głębokość deformacji [m]; k^* – współczynnik sztywności jednostkowej [N/(m·m²)].

Zakładając, że $E_k = E_D$, na podstawie (13) można określić prędkość samochodu na początku fazy zderzenia ze sztywną barierą

$$V = \sqrt{\frac{2E_D}{m}} = \sqrt{\frac{w_D \cdot h \cdot k^*}{m}} \cdot C \quad (14)$$

Jeżeli przyjmujemy, że wymiary w_D i h w niewielkim stopniu zależą od głębokości deformacji, a tym samym od prędkości zderzenia, to wzór (14) określa liniową zależność V od C . Do praktycznego wykorzystania zależności (14) potrzebne są wymiary deformacji samochodu (w_D, h, C) oraz wartość współczynnika k^* . Przykładowe wartości współczynnika k^* dla samochodów podano w pracach [3, 8, 9, 10, 11].

Na rysunku 8 pokazano zarys przedniej części samochodów, który wykorzystano do określenia uśrednionej wysokości strefy zgniotu. Rysunek opracowano na podstawie dokumentacji fotograficznej samochodów, podanej w raportach z badań [26]. Wysokość strefy zgniotu w odległości C^* oznaczono h_c (tabela 6). Uśrednioną wysokość deformacji h obliczono podobnie jak C_{sr} (wzór (1)). Warto tu podkreślić, że sposób określenia uśrednionej wysokości deformacji h jest tak samo kłopotliwy, jak wcześniej opisanej głębokości deformacji C_{sr} . Ponadto w opisach metody uproszczonej [10, 11] brakuje informacji, w jaki sposób obliczać uśrednioną szerokość i wysokość deformacji (w_D, h).

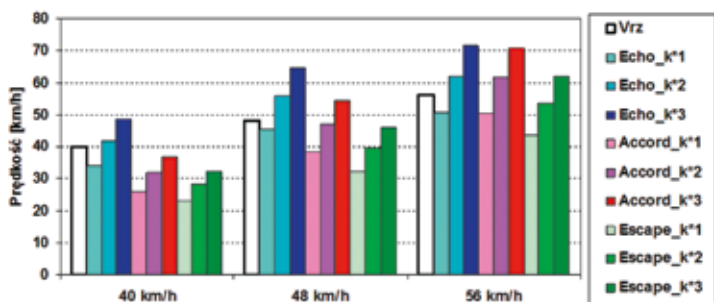


Rys. 8. Zarys przedniej części samochodów (strzałki pokazują zakres deformacji, przy prędkości 40, 48 i 56 km/h)

W tabeli 6 zestawiono dane do obliczeń prędkości zderzenia wg (14) dla trzech analizowanych samochodów. W obliczeniach przyjęto $C = C^*$ oraz założono, że uśredniona szerokość deformacji w_D jest równa szerokości samochodu, czyli $w_D = S$ (wcześniej, pod tabelą 2 podano uzasadnienie takiego wyboru). Wobec braku wartości współczynnika k^* dla analizowanych samochodów, na podstawie [11] przyjęto do obliczeń trzy jego wartości, mianowicie $10 \cdot 10^5$, $15 \cdot 10^5$ oraz $20 \cdot 10^5$ N/(m·m²). Wyniki obliczeń prędkości zderzenia pokazano na rysunku 9. Mimo iż do obliczeń przyjęto duży zakres zmian wartości współczynnika k^* , to przy prędkości 40 km/h obliczone wartości prędkości zderzenia dla samochodów Honda Accord i Ford Escape są znacznie mniejsze niż prędkość rzeczywista.

Tabela 6. Wyniki obliczeń uśrednionej wysokości deformacji h oraz wymaganej wartości współczynnika k^*

Prędkość [km/h]	Toyota Echo			Honda Accord			Ford Escape		
	40	48	56	40	48	56	40	48	56
h_c [m]	0,61	0,65	0,68	0,59	0,61	0,64	0,67	0,72	0,77
h [m]	0,489	0,519	0,545	0,464	0,518	0,538	0,503	0,558	0,597
k_w^* [N/(m·m ²)·10 ⁵]	13,9	11,2	12,5	23,9	15,7	12,3	30,5	22,0	16,6



Rys. 9. Wyniki obliczeń prędkości zderzenia przy wykorzystaniu danych z tabel 2 i 6

W ostatnim wierszu tabeli 6 podano wymagane wartości współczynnika k^* (oznaczenie k_w^*). Tylko w przypadku samochodu Toyota Echo wartości k_w^* w niewielkim stopniu zależą od prędkości zderzenia, mianowicie $k_w^* = (11,2 \div 13,9) \cdot 10^5$ N/(m·m²) (w pracy [9] jest $(11,9 \div 15,5) \cdot 10^5$ N/(m·m²)). W przypadku samochodów Honda Accord i Ford Escape uzyskano znaczną zależność wartości k_w^* od prędkości zderzenia, co poważnie ogranicza możliwość wykorzystania tej metody energetycznej. Podobne zależności wartości współczynnika k^* od prędkości zderzenia dla innych samochodów podano w pracy [8].

6. Metoda Campbella

W metodzie Campbella mamy liniową zależność między prędkością V uderzenia w barierę a głębokością C trwałej deformacji nadwozia [2, 10, 11, 20, 24]:

$$V = b_0 + b_1 \cdot C \quad (15)$$

gdzie: b_0 – prędkość graniczna, przy której powstaje trwała deformacja nadwozia;
 b_1 – współczynnik kierunkowy prostej na wykresie $V = f(C)$.

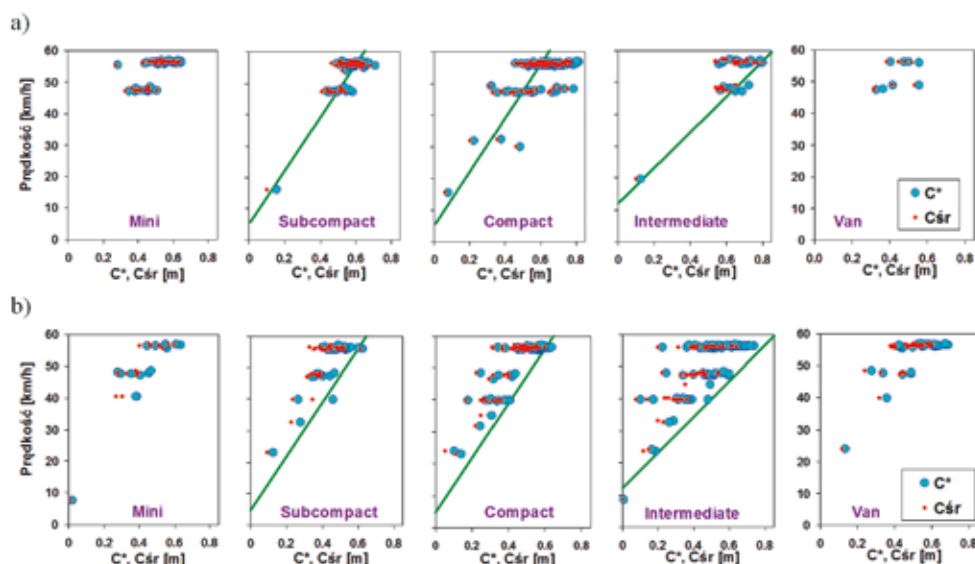
W tabeli 7 podano wartości współczynników b_0 i b_1 dla kilku kategorii samochodów, z lat 70-tych XX wieku. Na rysunku 10 pokazano relacje pomiędzy prędkością uderzenia w barierę a deformacją C^* i C_{sr} samochodów opisanych w tabeli 3. Linie proste na wykresach

przedstawiają zależność (15) dla współczynników b_0 i b_1 z tabeli 7. Na wykresach dotyczących samochodów z lat 1974-1989 (rys. 10a) wiele punktów na wykresach skupionych jest wokół linii prostych co potwierdza, że wartości współczynników b_0 i b_1 z tabeli 7 dobrze opisują relacje pomiędzy deformacją a prędkością uderzenia w barierę wielu samochodów. W przypadku samochodów z lat 1994-2013 (rys. 10b) niemal wszystkie punkty na wykresach położone są powyżej linii prostych, czyli prędkość rzeczywista jest większa lub znacznie większa niż prędkość obliczona na podstawie wartości współczynników b_0 i b_1 z tabeli 7.

Tabela 7. Współczynniki b_0 i b_1 dla samochodów General Motors [2]

Rocznik	Kategoria samochodu	Masa [kg]	b_0 [km/h]	b_1 [(km/h)/m]
1971-1974	Małe (<i>subcompact</i>)	1130	4,8	85,5
1971-1974	Kompaktowe (<i>compact</i>)	1540		
1973-1974	Średnie (<i>intermediate</i>)	1810	12,1	55,7
1973-1974	Duże (<i>full size</i>)	2040		

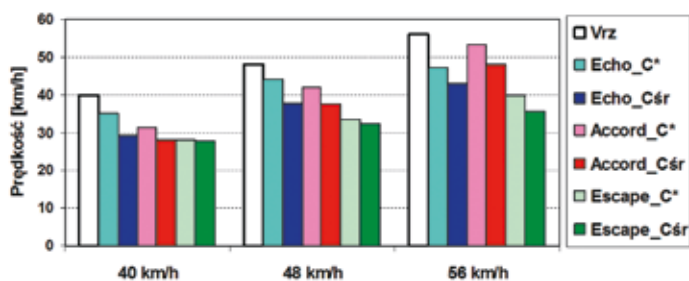
Uwagę zwraca znaczna rozpiętość deformacji samochodów, przy danej prędkości zderzenia. Stan taki poważnie ogranicza możliwość aproksymacji wyników uzyskanych dla danej kategorii samochodów jedną funkcją liniową. Konieczne są bardziej szczegółowe kryteria podobieństwa samochodów, uwzględniające nie tylko ich masę i wymiary (por. tab.3), ale także konstrukcję nadwozia, pojemność i sposób ustawienia silnika, zwis przedni, rozmiar ogumienia itp.



Rys. 10. Relacje pomiędzy deformacją a prędkością uderzenia w barierę
a) samochody z lat 1974-1989 (n=236), b) samochody z lat 1994-2013 (n=240)

Zastosowanie współczynników b_0 i b_1 z tabeli 7 do samochodów opisanych w tabeli 1 również nie daje dobrych wyników. Na podstawie masy samochodów, dla Toyoty Echo i Hondy Accord przyjęto $b_0=4,8$ km/h i $b_1=85,3$ km/h/m a dla Forda Ecsape $b_0=12,1$ km/h i $b_1=55,7$ km/h/m. Wyniki obliczeń prędkości zderzenia wg (15) pokazano na rysunku 11. Wynika z nich, że obliczona prędkość zderzenia jest zwykle znacznie mniejsza niż prędkość rzeczywista:

- Toyota Echo, $73,4 \div 92,3\%$ prędkości rzeczywistej;
- Honda Accord, $69,8 \div 95,4\%$ prędkości rzeczywistej;
- Ford Escape, $63,4 \div 71,3\%$ prędkości rzeczywistej.

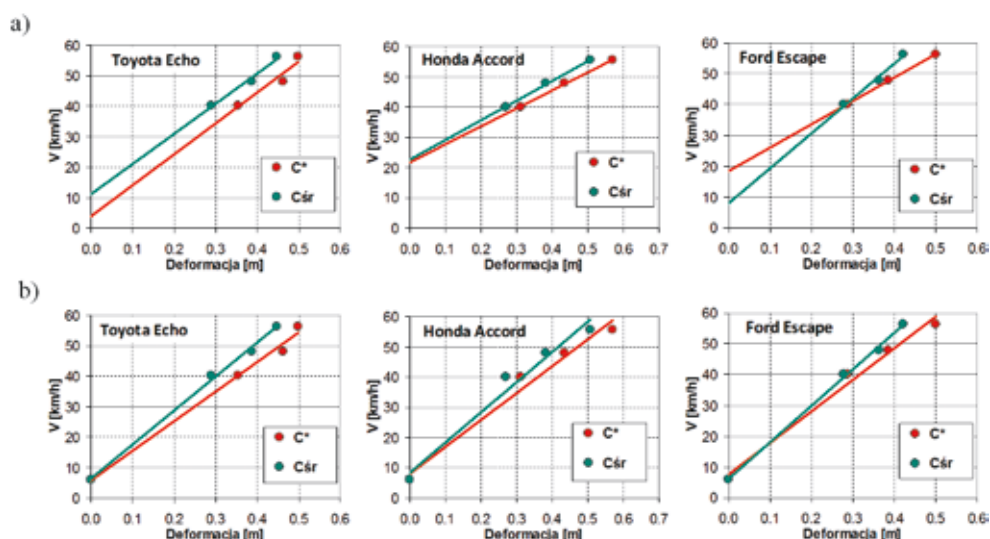


Rys. 11. Wyniki obliczeń prędkości zderzenia przy wykorzystaniu współczynników b_0 i b_1 z tabeli 7

Potwierdzono zatem, że korzystanie z współczynników b_0 i b_1 , opracowanych dla innych konstrukcji samochodów, może być źródłem błędów podczas rekonstrukcji wypadku. Dlatego obliczono wartości współczynników b_0 i b_1 dla analizowanych w tej pracy trzech samochodów. W tym celu wykorzystano wyników pomiarów deformacji (rys.3, tabela 2) przy danej prędkości uderzenia w przeszkodę. Na rysunku 12 pokazano wykresy $V=f(C)$ dla analizowanych samochodów. Przez punkty określające deformację C^* i C_{sr} poprowadzono linie trendu. Mają one inny przebieg niż na rysunku 7, bowiem dotyczą deformacji plastycznej (C) a nie dynamicznej (D). Zgodnie z założeniem modelu Campbella, linie te przecinają pionową oś wykresu przy prędkości granicznej b_0 . W przypadku samochodu Honda Accord wartość b_0 jest około 23 km/h a dla Forda Escape mamy b_0 od 9 do 19 km/h.

Tak duże wartości b_0 wydają się być wątpliwe tym bardziej, że wcześniej uzyskano znacznie mniejsze wartości prędkości granicznej na podstawie przebiegu charakterystyki sztywności (V_0 w tabeli 5). Jednak brakuje aktualnych danych o współczesnych samochodach, potwierdzających poprawność wartości V_0 , uzyskanych w punkcie 4. W pracy [16] z 1986 roku zaproponowano, by wartość $V_0=b_0$ przyjmować nie mniejszą niż 8 km/h (5 mph). W pracy [17] z 1998 roku podano, że Ford Escort uległ deformacji 0,05 m przy prędkości 13 km/h. W bazie danych NHTSA [26] są dostępne wyniki tylko kilkunastu testów zderzeniowych, przy prędkości uderzenia w sztywną barierę poniżej 40 km/h. Uwzględniono je na rysunku 10. Bez względu na masę samochodów ich deformacja (C^*) przy prędkości 23 km/h jest w przedziale $0,10 \div 0,19$ m, a przy prędkości 32 km/h w przedziale $0,24 \div 0,32$ m. Występowanie niewielkiej deformacji plastycznej ($0,01 \div 0,02$ m) stwierdzono już przy prędkości około 7 km/h. Uwzględniając powyższe założono dla wszystkich trzech

samochodów, że $V_0=6$ km/h i ponownie wyznaczono linie trendu na wykresach $V=f(C)$. Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 12b, a w tabeli 8 zestawiono określone na ich podstawie wartości współczynników b_0 i b_1 .



Rys. 12. Zależność prędkości zderzenia od deformacji plastycznej
a) bezpośrednia aproksymacja wyników pomiarów funkcją liniową,
b) aproksymacja przy założeniu, że $b_0=6$ km/h

Tabela 8. Wartości współczynników b_0 i b_1 dla samochodów Toyota Echo, Honda Accord i Ford Escape

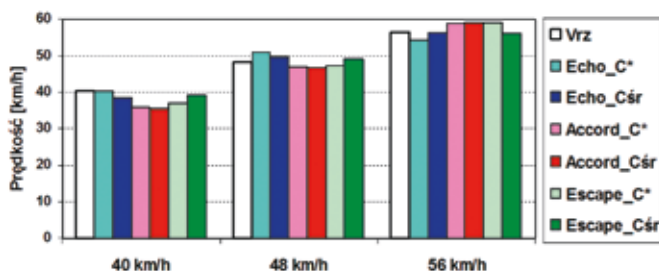
Współczynnik	Toyota Echo		Honda Accord		Ford Escape	
	$C = C^*$	$C = C_{sr}$	$C = C^*$	$C = C_{sr}$	$C = C^*$	$C = C_{sr}$
b_0 [km/h]	5,9	6,4	8,2	8,5	7,60	6,10
b_1 [(km/h)/m]	97,0	111,8	89,1	100,1	102,7	118,5
D_0 [m]	0,061	0,057	0,092	0,085	0,074	0,051

Wyniki obliczeń prędkości zderzenia wg (15) oraz współczynników b_0 i b_1 z tabeli 8 pokazano na rysunku 13. Obliczone wartości prędkości zderzenia są podobne do wartości prędkości rzeczywistej, mianowicie:

- Toyota Echo, 95,5÷105,4% prędkości rzeczywistej;
- Honda Accord, 88,4÷106,3% prędkości rzeczywistej;
- Ford Escape, 92,3÷104,5% prędkości rzeczywistej.

Oczywiście, gdyby współczynniki b_0 i b_1 określono na podstawie rysunku 12a, to różnice

pomiędzy wartościami prędkości obliczonej i rzeczywistej, w zakresie 40÷56 km/h, byłyby jeszcze mniejsze niż podano powyżej. Natomiast wykorzystanie tak przygotowanych parametrów modelu mogłoby skutkować pogorszeniem wyników obliczeń w zakresie mniejszych prędkości.



Rys. 13. Wyniki obliczeń prędkości zderzenia przy wykorzystaniu współczynników b_0 i b_1 z tabeli 8

Na podstawie (15) można zapisać

$$V = b_1 \cdot C + b_0 = b_1 \cdot (C + D_0) \quad (16)$$

i obliczyć deformację sprężystą D_0 na początku zgniatania nadwozia

$$D_0 = \frac{b_0}{b_1} \quad (17)$$

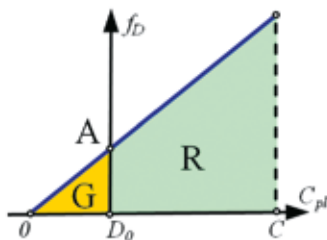
Obliczone w ten sposób wartości D_0 (tabela 8) oraz ustalone na podstawie charakterystyki sztywności (tabela 4) są podobne, co może potwierdzać poprawność przyjętych w obliczeniach założeń.

7. Metoda McHenry'ego

W metodzie McHenry'ego mamy liniową zależność między jednostkową siłą deformacji f_D , odniesioną do szerokości nadwozia, a deformacją plastyczną nadwozia [6, 7, 11, 20, 24]:

$$f_D = A + B \cdot C_{pl} \quad (18)$$

gdzie: A – jednostkowa siła graniczna, po przekroczeniu której dochodzi do odkształcenia plastycznego [N/m]; B – współczynnik kierunkowy prostej na wykresie $f_D = f(C)$ [(N/m)/m]; C_{pl} – deformacja plastyczna nadwozia [m].



**Rys. 14. Liniowy model sztywności nadwozia, przyjęty przez McHenry'ego;
 D_0 – deformacja sprężysta nadwozia**

Na podstawie (17) całkowita energia deformacji sprężysto-plastycznej jest opisana zależnością:

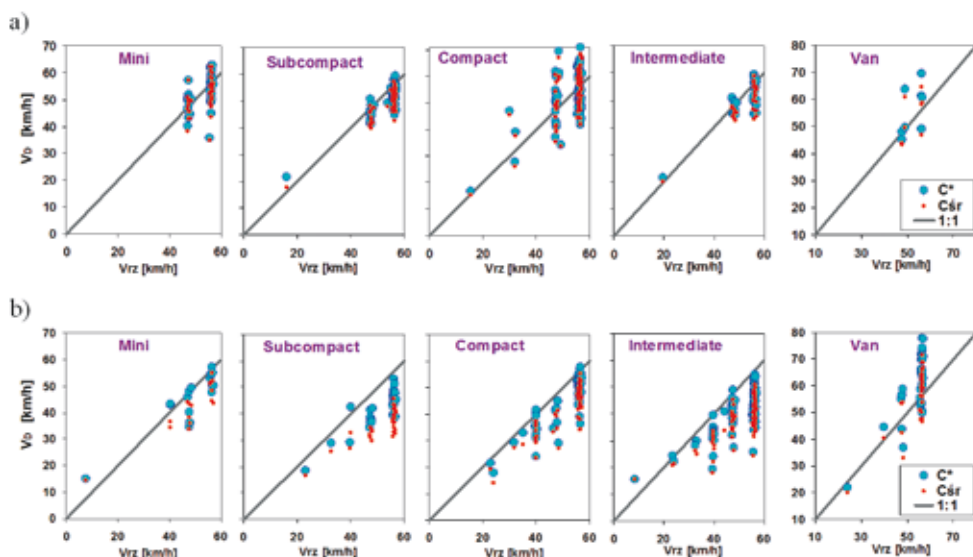
$$E_D = w_D \cdot \int_0^C f_D dC_{pl} = w_D \cdot (G + R) = w_D \cdot \left(\frac{A^2}{2 \cdot B} + A \cdot C + \frac{B \cdot C^2}{2} \right) \quad (19)$$

gdzie: w_D – szerokość deformacji, G – ujednostkowiona energia deformacji sprężystej, R – jednostkowa energia deformacji plastycznej.

Wartości parametrów A i B zależą od właściwości czołowej strefy zgniotu samochodu. W tabeli 9 podano uśrednione dla danej kategorii samochodów wartości współczynników A i B [11]. Wykorzystując wyniki testów zderzeniowych samochodów z tabeli 3 na rysunku 15 pokazano relacje pomiędzy prędkością rzeczywistą V_{rz} a prędkością $V_{D'}$ obliczoną na podstawie zależności (9) i (19). W obliczeniach uwzględniono deformację C^* i C_{st} .

Tabela 9. Wartości współczynników A i B w programie CRASH3 (Computer Reconstruction of Accident Speeds on the Highway)

Kategoria	Rozstaw osi [m]	Długość [m]	Szerokość [m]	Masa [kg]	A [kN/m]	B [kN/m ²]
Mini (M)	2,05...2,40	4,05	1,54	1000	52,9	320
Subcompact (S)	2,40...2,58	4,44	1,70	1386	45,4	300
Compact (C)	2,58...2,80	4,98	1,84	1610	55,5	390
Intermediate (I)	2,80...2,98	5,40	1,95	1928	62,3	230
Van (V)	2,76...3,30	4,66	2,00	1952	67,1	870



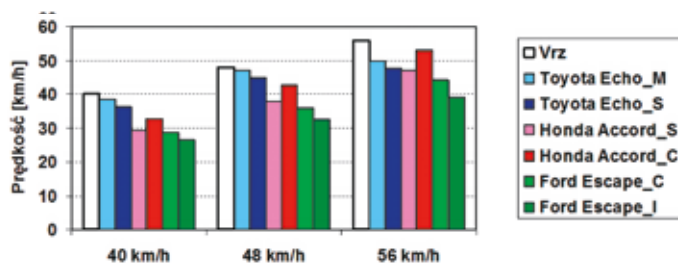
Rys. 15. Relacje pomiędzy prędkością rzeczywistą a prędkością obliczoną na podstawie zależności (9) i (19), (A , B z tabeli 9) a) samochody z lat 1974-1989 ($n=236$), b) samochody z lat 1994-2013 ($n=240$)

Dla znacznej liczby samochodów produkowanych w latach 1974-1989 wartości prędkości obliczonej V_D i rzeczywistej V_{rz} są podobne. Wyniki obliczeń prędkości V_D dla samochodów produkowanych w latach 1994-2013 są wyraźnie mniejsze od prędkości rzeczywistej V_{rz} . Stan taki bezpośrednio wynika z wcześniejszych ustaleń, że wartość deformacji we współczesnych samochodach jest mniejsza niż w samochodach z lat 1974-1989 (por. rys.4).

Wybór współczynników A i B z tabeli 9 do analizowanych w pracy trzech samochodów wymaga zakwalifikowania ich do danej kategorii. Na podstawie masy i wymiarów jest to trudne, dlatego każdy z samochodów zakwalifikowano do dwóch kategorii. Wyniki obliczeń prędkości zderzenia na podstawie współczynników A i B z tabeli 9, przy uwzględnieniu deformacji C^* z tabeli 2, pokazano na rysunku 16. Wartości prędkości obliczonej są mniejsze niż prędkość rzeczywista. Różnice te są następujące:

- Toyota Echo (masa 1140 kg), 2÷11% (mini) oraz 7÷16% (subcompact),
- Honda Accord (masa 1550 kg), 5÷19% (subcompact) oraz 15÷28% (compact),
- Ford Escape (masa 1770 kg), 30÷34% (compact) oraz 22÷29% (intermediate).

Przykłady wyników obliczeń, które podano na rysunkach 15b i 16 potwierdzają, że korzystanie ze współczynników A i B , opracowanych dla dawnych konstrukcji samochodów, może być źródłem znacznych błędów podczas obliczeń prędkości zderzenia. Gdyby w obliczeniach wykorzystać C_{sr} zamiast C^* , to obliczone wartości prędkości byłyby jeszcze mniejsze, bowiem $C_{sr} < C^*$ (tabela 2).

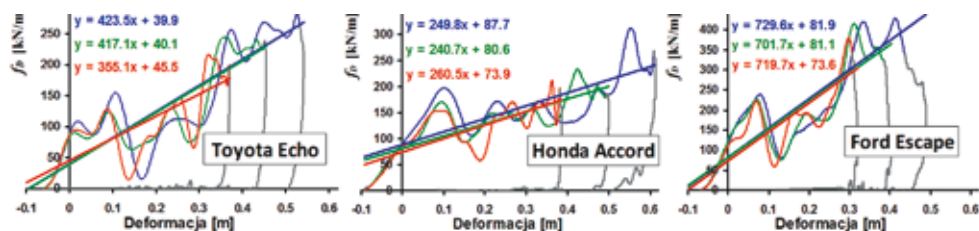


Rys. 16. Wyniki obliczeń prędkości zderzenia przy wykorzystaniu współczynników A i B z tabeli 9 (litery M, S, C, I oznaczają kategorię samochodu, wg tabeli 3)

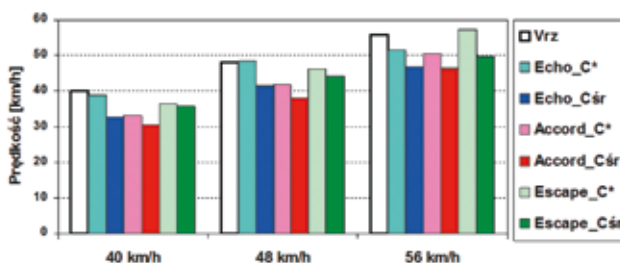
W celu określenia wartości współczynników A i B dla analizowanych w pracy samochodów, charakterystyki sztywności przy danej prędkości zderzenia zostały uśrednione i podzielone na dwie części (por. rys.14 i 17), przy czym pierwsza z nich obejmuje zakres deformacji sprężystej (do wartości D_0). Wartości siły podzielono przez szerokość deformacji ($w_D = S$), uzyskując jednostkowe charakterystyki sztywności, które aproksymowano funkcjami liniowymi, pomijając ich końcowe odcinki. W ten sposób dla każdego samochodu uzyskano trzy równania liniowe, odpowiadające prędkości 40, 48 i 56 km/h. Wartości średnie współczynników tych równań przyjęto jako wartości współczynników A i B w modelu McHenry'ego. Ich wartości zestawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Parametry modelu McHenry'ego określone na podstawie charakterystyk sztywności samochodów

Samochód	Toyota Echo			Honda Accord			Ford Escape		
Prędkość [km/h]	40	48	56	40	48	56	40	48	56
A [kN/m]	45,5	40,1	39,9	73,9	80,6	87,7	73,6	81,1	81,9
A_{sr} [kN/m]		41,8			80,7			78,9	
B [kN/m ²]	355,1	417,1	423,5	260,5	240,7	249,8	719,7	701,7	729,6
B_{sr} [kN/m ²]		399			250			717	



Rys. 17. Aproksymacja jednostkowych charakterystyk sztywności funkcjami liniowymi



Rys. 18. Wyniki obliczeń prędkości zderzenia przy wykorzystaniu współczynników A_{sr} i B_{sr}

Uwzględniając wyznaczone w opisany wyżej sposób wartości współczynników A_{sr} i B_{sr} , obliczono prędkość zderzenia wg (9) i (19). Uzyskano następujące relacje pomiędzy obliczoną prędkością zderzenia a prędkością rzeczywistą (rys.18):

- Toyota Echo, $81,4 \div 100,7\%$ prędkości rzeczywistej;
- Honda Accord, $75,4 \div 91,0\%$ prędkości rzeczywistej;
- Ford Escape, $88,1 \div 101,9\%$ prędkości rzeczywistej.

W porównaniu do wyników uzyskanych metodą Campbella (rys.13) te wyniki obliczeń prędkości zderzenia bardziej różnią się od prędkości rzeczywistej. Największe różnice mamy w przypadku Hondy Accord, gdzie każda obliczona wartość prędkości jest mniejsza od wartości rzeczywistej o $9 \div 24\%$.

8. Wyniki konwersji parametrów modelu Campbella i McHenry'ego

Wartości parametrów modelu Campbella i McHenry'ego określono na podstawie tych samych testów zderzeniowych, ale na podstawie innych wielkości, które pomierzono podczas badań analizowanych w pracy samochodów. Ponieważ oba modele energetyczne dotyczą tego samego procesu deformacji nadwozia, to ich parametry można powiązać za pomocą następujących zależności [5, 11, 20, 24]:

$$b_0 = A \cdot \sqrt{\frac{w_D}{B \cdot m}}, \quad b_1 = \sqrt{\frac{B \cdot w_D}{m}} \quad (20)$$

$$A = \frac{m \cdot b_0 \cdot b_1}{w_D}, \quad B = \frac{m \cdot b_1^2}{w_D} \quad (21)$$

Obliczone w ten sposób wartości parametrów modeli zestawiono w tabelach 11 i 12. W obliczeniach współczynników A i B uwzględniono wartości parametrów b_0 i b_1 , które wcześniej wyznaczono uwzględniając $C=C^*$ oraz $C=C_{sr}$ (por. tabela 8). Na rysunku 19 pokazano ilustrację graficzną zastosowania parametrów z tabel 8, 10, 11 i 12.

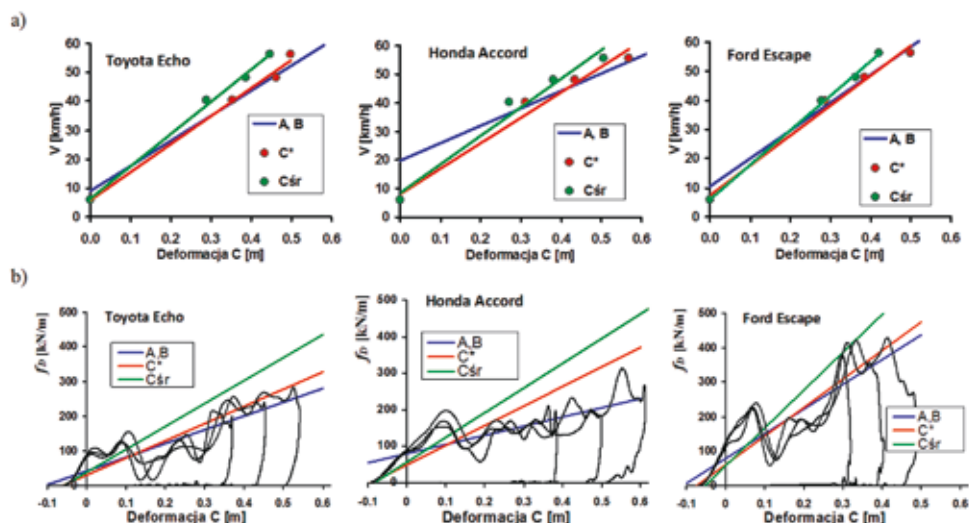
Tabela 11. Wartości parametrów b_0 , b_1 i D_0 obliczone na podstawie (20) i (17)

Parametr	Toyota Echo	Honda Accord	Ford Escape
b_0 [km/h]	9,1	19,7	10,5
b_1 [(km/h)/m]	86,9	61,0	95,8
D_0 [m]	0,105	0,322	0,110

Tabela 12. Wartości parametrów A i B obliczone na podstawie (21)

Parametr	Toyota Echo		Honda Accord		Ford Escape	
	$C = C^*$	$C = C_{sr}$	$C = C^*$	$C = C_{sr}$	$C = C^*$	$C = C_{sr}$
A [kN/m]	30.1	38.0	49.3	57.3	61.0	56.5
B [kN/m ²]	497	661	534	674	825	1098

W przypadku Toyoty Echo i Forda Escape proste oznaczone przez (A, B) i (C^*) mają podobny przebieg, co potwierdza że obie metody dają podobne wyniki. Wyraźnie inny przebieg ma linia oznaczona przez (C_{sr}) , co wynika z zależności $C_{sr} < C^*$. W przypadku Hondy Accord uzyskano znacznie większe różnice. Zwróćmy jednak uwagę, że podane w tabeli 11 wartości parametrów modelu Campbella dla Hondy Accord, obliczone na podstawie A_{sr} i B_{sr} z tabeli 10 są mało prawdopodobne ($b_0=19,7$ km/h, $D_0=0,32$ m). Ten przykład obliczeniowy potwierdza, że wyniki obliczeń prędkości zderzenia niektórych samochodów w oparciu o liniowe modele energetyczne, mogą być obarczone znacznym błędem.



Rys. 19. Wyniki zastosowania konwersji współczynników modelu Campbella i McHenry'ego; a) zależność prędkości zderzenia od deformacji plastycznej, b) aproksymacja jednostkowych charakterystyk sztywności funkcjami liniowymi (A, B – linie opracowane na podstawie charakterystyki sztywności, C^* i C_{sr} – linie opracowane na podstawie deformacji plastycznej samochodów)

9. Wnioski

1. Stosowanie metod energetycznych ograniczone jest dostępnością parametrów modeli liniowych (k^* , b_o , b_i , A , B) dla współczesnych samochodów. Zderzenie czołowe samochodu ze sztywną barierą jest najprostszym do analizy rodzajem zderzenia, jednak wyznaczenie parametrów tych modeli energetycznych dla trzech samochodów okazało się dość trudne, przy czym nie dla wszystkich samochodów uzyskano zadowalające wyniki obliczeń prędkości zderzenia w oparciu o wyznaczone parametry.
2. Pomiary deformacji samochodu są dość kłopotliwe a ich wyniki mogą istotnie wpływać na obliczoną wartość prędkości zderzenia. Dlatego ważne jest sprecyzowanie, w jaki sposób definiowane są wymiary tej deformacji (C , w_D , h). Ma to szczególne znaczenie przy analizie deformacji współczesnych samochodów, w których strefy zgniotu są bardziej sztywne niż we wcześniejszych konstrukcjach nadwozi samonośnych (por. rys.4). W przypadku samochodów, gdzie zmiana prędkości zderzenia nie powoduje istotnej zmiany deformacji, wyniki obliczeń prowadzonych w oparciu o modele liniowe mogą być obarczone dużym błędem.
3. Metoda uproszczona, bazująca na współczynniku sztywności jednostkowej k^* okazała się skuteczna tylko dla Toyoty Echo. W przypadku Hondy Accord i Forda Escape ustalono, że wartość współczynnika k^* silnie zależy od prędkości zderzenia, co praktycznie wyklucza stosowanie tej metody przy $k^* = \text{const}$.
4. Podstawą do określenia parametrów do metody McHenry'ego była analiza charakterystyki sztywności nadwozia, która wyróżnia się zwykle silnie nieliniowym przebiegiem, a to ogranicza poprawność jej opisu za pomocą modeli liniowych. Określenie współczynników A i B do metody McHenry'ego jest pracochłonne, ale relacje pomiędzy prędkością zderzenia a deformacją można prognozować na podstawie tylko jednego testu zderzeniowego (niszczony jest tylko jeden samochód), co jest niewątpliwie zaletą tej metody.
5. Najlepsze rezultaty w obliczeniach prędkości zderzenia uzyskano przy zastosowaniu metody Campbella. Wyznaczenie współczynników b_o i b_i wymaga jednak uwzględnienia (przeprowadzenia) kilku testów zderzeniowych, przy różnych wartościach prędkości uderzenia w przeszkodę. Dobór parametrów modelu Campbella był utrudniony, ze względu na brak wiarygodnych danych o deformacji współczesnych samochodów przy małych wartościach prędkości zderzenia. Problem ten można rozwiązać, podając parametry modelu dla ograniczonego zakresu deformacji.
6. Przedstawione w pracy wyniki badań upoważniają do stwierdzenia, że modele liniowe słabo opisują właściwości czołowej strefy zgniotu współczesnych samochodów. Parametry modeli energetycznych, wyznaczone dla konkretnych samochodów w oparciu o szczegółową analizę wyników ich badań, mogą nie zapewniać poprawnych wyników. W opisanych w pracy przykładach obliczona wartość prędkości zderzenia różniła się niekiedy nawet o 20% od prędkości rzeczywistej. Jeszcze gorsze wyniki są uzyskiwane, jeżeli w modelach energetycznych uwzględnione zostaną parametry opracowane dla samochodów o innej konstrukcji (różnice około 30%).

7. Uwzględniając, że wyniki rekonstrukcji wypadków drogowych wykorzystywane są w sprawach sądowych i mają aspekt społeczny, to parametry modeli energetycznych powinny być przygotowywane w sposób umożliwiający określenie niepewności uzyskanego wyniku obliczeń, na co zwracają uwagę także inni autorzy, m.in. w pracach [4, 23]. Możliwości takie dają wyniki badań zgromadzone w bazie danych NHTSA [26] (także zderzenia boczne, w tym zderzenia ze słupem). Jednak wyniki podane na rysunku 10 pokazują, że możliwość opracowania parametrów liniowych modeli energetycznych dla danej kategorii pojazdów może być bardzo ograniczona, ze względu na znaczny rozrzut tych wyników, spowodowany różnorodnością właściwości stref zgniotu nawet podobnych samochodów.

Literatura

- [1] Brach R.M., Brach R.M.: *Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods*, SAE International, USA, 2011.
- [2] Campbell K.L.: *Energy Basis for Collision Severity*. SAE Paper 740565, 1974.
- [3] Diupero T., Górny A., Wolski E.: *Ustalanie prędkości zderzenia w oparciu o zakres uszkodzeń samochodu*. Rzeczoznawca Samochodowy 8/2000.
- [4] Jiang T., Grzebieta R.H., Rehnitz G., Richardson S., Zhao X.L.: *Review of Car Frontal Stiffness Equations for Estimating Vehicle Impact Velocities*, The 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV), Nagoya, 2003.
- [5] Jankowski P., Gidlewski M., Jemioł L.: *Comparative Study of Vehicle Absorbed Energy Determination for Road Accident Reconstruction*. XVI Konferencja EVU „Niepewność w rekonstrukcji wypadków drogowych”, Kraków 2007.
- [6] McHenry R. R., McHenry B. G.: *Effects of Restitution in the Application of Crush Coefficients*, SAE Paper 970960, 1997.
- [7] McHenry R.R., McHenry B.G.: *A Revised Damage Analysis Procedure for the CRASH Computer Program*, SAE Paper 861894, 1986.
- [8] Owsiański R.: *Rastry energetyczne samochodów osobowych dla zderzeń czołowych*, Paragraf na Drodze nr 9/2007.
- [9] Owsiański R.: *Szacowanie energii deformacji nadwozi kompaktowych samochodów osobowych*, Paragraf na Drodze nr 4/2007.
- [10] Praca zbiorowa.: *Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego*. Wydanie II, Instytut Ekspertyz Sądowych, Kraków 2006.
- [11] Prochowski L., Unarski J., Wach W., Wicher J.: *Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych*. WKŁ, Warszawa 2008.
- [12] Prochowski L., Żuchowski A.: *Rastry energetyczne wykorzystywane do opisu rozkładu energochłonności przedniej części nadwozia*. IV Konferencja Naukowo-Szkoleniowa „Rozwój techniki samochodowej a ubezpieczenia komunikacyjne”, Radom, 2008.
- [13] Prochowski L., Żuchowski A.: *Rozkład energii pochłanianej podczas czołowego uderzenia samochodu w przeszkodę*. X konferencja „Problemy rekonstrukcji wypadków drogowych”, Szczyrk 2006.
- [14] Prochowski L., Żuchowski A.: *Comparative Analysis of Frontal Zone of Deformation in Vehicles with Self-Supporting and Framed Bodies*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol.18, No.4, Warszawa 2011.
- [15] Prochowski L., Żuchowski A.: *Właściwości nadwozia w zakresie pochłaniania energii podczas uderzenia samochodu w sztywną przeszkodę*. V konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy bezpieczeństwa w pojazdach samochodowych”, Kielce 2006.
- [16] Strother Ch. E., Woolley R. L., James M. B., Warner Ch.: *Crush Energy in Accident Reconstruction*, SAE 860371, 1986.

- [17] Steffan H., Geigl B.C., Moser A., Hoschopf H.: *Comparison of 10 to 100 km/h Rigid Barrier Impacts*, The 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV), Windsor 1998.
- [18] Vangi D.: *Simplified Method for Evaluating Energy Loss in Vehicle Collisions*, Accident Analysis and Prevention, 41/2009.
- [19] Varat M.S., Husher S.E.: *Crash Pulse Modelling for Vehicle Safety Research*, The 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV), Nagoya, 2003.
- [20] Wach W.: *Amerykańskie standardy analizy zderzeń pojazdów*. VIII Konferencja „Problemy rekonstrukcji wypadków drogowych”, IES, Kraków 2002.
- [21] Wach W.: *Analiza deformacji samochodu według standardu CRASH3. Część 1: Wprowadzenie*, Paragraf na Drodze nr 11/2003.
- [22] Wach W.: *Analiza deformacji samochodu według standardu CRASH3. Część 2: Pomiar głębokości odkształcenia*, Paragraf na Drodze nr 12/2003.
- [23] Wang Q., Gabler H.C.: *Accuracy of Vehicle Front al Stiffness Estimates for Crash Reconstruction*. The 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV), Lyon 2007.
- [24] Wicher J.: *Energetyczne metody analizy zderzeń samochodów*, III Konferencja Naukowo-Szkoleniowa „Rozwój techniki samochodowej a ubezpieczenia komunikacyjne”, Radom 2006.
- [25] Żuchowski A., Prochowski L.: *Sztywność nadwozia – analiza sił działających na przeszkodę podczas zderzenia*. VI Konferencja Naukowo-Techniczna: Problemy bezpieczeństwa w pojazdach samochodowych, Kielce 2008.
- [26] www.nhtsa.gov