

Damian Kociemba *  <https://orcid.org/0000-0002-6604-858X>
e-mail: kociemba.damian.kd@gmail.com

Deformacja pojazdów przy zderzeniu czołowym – analiza porównawcza wyników testów zderzeniowych modeli wyprodukowanych w latach 1993–1997 oraz 2011–2015

https://doi.org/10.25312/2391-5129.32/2021_11dk

Celem publikacji jest weryfikacja hipotezy mówiącej, że pojazdy produkowane współcześnie pomimo zwiększonej masy własnej, a przez to większej energii kinetycznej uwalnianej podczas zderzenia czołowego potrafią ulegać mniejszym odkształceniom nadwozia. Autorzy dokonują tego na podstawie dwunastu raportów testów zderzeniowych przeprowadzonych przez amerykańską organizację NHTSA (ang. National Highway Traffic Safety Administration). Sześć spośród nich zostało sporządzonych dla samochodów wyprodukowanych w ostatniej dekadzie XX wieku, reszta natomiast dla pojazdów wyprodukowanych w latach 2011–2015. W oparciu o raporty możliwe było stworzenie porównania głębokości odkształcenia dla tych pojazdów oraz dokonanie obliczeń uwzględniających takie parametry, jak: uwolniona energia kinetyczna, procentowa zmiana w długości całkowitej pojazdów oraz średnia głębokość deformacji.

Słowa kluczowe: deformacja pojazdu, zderzenie czołowe, strefa kontrolowanego zgniotu, bezpieczeństwo pojazdów

* Inż. Damian Kociemba – absolwent kierunku transport na Wydziale Techniki i Informatyki Akademii Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi.

Wprowadzenie

Postępująca od wielu lat intensyfikacja przewozów drogowych przekłada się na występowanie różnych zdarzeń o różnym stopniu zagrożenia dla podróżujących. Wśród tych najgroźniejszych bez wątpienia są zderzenia pojazdów boczne oraz czołowe. Przeciwdziałanie ich skutkom jest możliwe dzięki zastosowaniu odpowiednich elementów konstrukcyjnych w pojeździe, takich jak strefa kontrolowanego zgniotu oraz wzmocnienia boczne tworzące klatkę bezpieczeństwa w kabinie. Elementy te zaliczane są do jednego z dwóch typów bezpieczeństwa ważnego przy projektowaniu pojazdów – bezpieczeństwa biernego oznaczającego takie cechy konstrukcyjne i techniczne pojazdu, które poprzez nadane w procesie produkcyjnym właściwości zapewniają maksymalną ochronę kierującego i pasażerów. Aby ta ochrona była możliwa, konieczne jest odpowiednie przenoszenie sił oddziałujących w trakcie zderzenia w taki sposób, żeby rozchodziły się one po całej konstrukcji pojazdu i dotyczyły w jak najmniejszym stopniu osoby przebywające wewnątrz.

Stąd też celem publikacji jest weryfikacja następującej hipotezy: pojazdy produkowane współcześnie, pomimo zwiększonej masy własnej, a przez to większej energii kinetycznej uwalnianej podczas zderzenia czołowego, potrafią ulegać mniejszym odkształceniom nadwozia.

Weryfikacja hipotezy została dokonana na podstawie dwunastu raportów testów zderzeniowych przeprowadzonych przez amerykańską organizację NHTSA dla następujących pojazdów:

1. Ford F150 (rok produkcji 1993 i 2015),
2. Ford Mustang (rok produkcji 1994 i 2015),
3. Honda Civic (rok produkcji 1994 i 2016),
4. Toyota Corolla (rok produkcji 1994 i 2015),
5. Toyota RAV4 (rok produkcji 1997 i 2015),
6. Volkswagen Passat (rok produkcji 1994 i 2011).

Szczegółowa charakterystyka pojazdów biorących udział w testach została przedstawiona w artykule pod tytułem *Safety as a key aspect in the creation of motor vehicles* opublikowanym w numerze 1/2020 czasopisma „Zarządzanie Innowacyjne w Gospodarce i Biznesie” Akademii Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi.

Metodami badawczymi, jakimi posłużyli się autorzy, są: metoda analizy i krytyki piśmiennictwa oraz metoda badania dokumentów.

Odształcenia nadwozia – wstęp do problematyki

Badanie odkształceń nadwozia przebiega dwuetapowo (Owczarz i in., 2014: 215):

1. Pomiar kontrolny pojazdu nieuszkodzonego, gdzie odtwarzany jest wzór kształtu przedniej części pojazdu. Do wspomnianego odtworzenia najczęściej używa się przyrządu pomiarowego składającego się z listew ułożonych pod

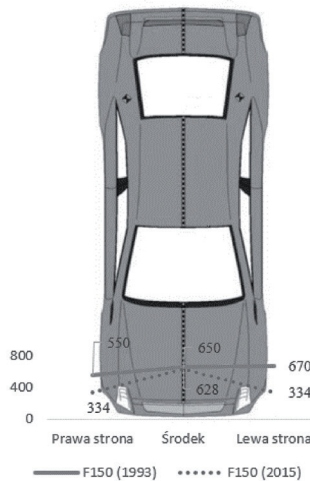
kątem prostym względem czoła samochodu, które należy przesuwac do momentu, w którym będą one stykać się z nadwoziem.

2. Pomiar porównawczy pojazdu uszkodzonego, podczas którego wykorzystywane jest to samo narzędzie pomiarowe. Podczas tego etapu należy dopasować długość listew do powstałej deformacji, pamiętając o konieczności wyznaczenia punktu zerowego (którym może być chociażby całkowita długość pojazdu).

W dwóch przypadkach dane te – w oparciu o raporty NHTSA – zostały przedstawione we wspomnianym już artykule *Safety as a key aspect in the creation of motor vehicles*. Pomiar deformacji zaprezentowane w tamtym artykule i użyte w niniejszej publikacji dotyczyły tylko trzech punktów, tj. prawej strony, środka (osi) oraz lewej strony pojazdu.

Prezentacja wyników obliczeń oraz porównań⁴

Odształcenia dla pojazdów Ford model F150 pochodzących z 1993 roku oraz 2015 roku:



Rysunek 1. Zilustrowanie obrażeń poniesionych przez pojazd marki Ford F150 podczas zderzeń czołowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie Report number: MSE-94-04, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Ford Motor Company, 1994 Ford F150 Pickup, s. 7 oraz Report number: NCAP-MGA-2015-061, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Ford Motor Co., 2015 Ford F-150 SuperCab XL 4x4, s. 25–26 (21–22).

⁴ Wszystkie rysunki przedstawiające w tym podrozdziale samochody pochodzą z: Report number: NCAP-KAR-15-022, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Ford Motor Co., 2015 Ford Mustang, s. 20 (16).

Skutki uderzenia czołowego w nowszym pojeździe wyprodukowanym w 2015 roku były zdecydowanie mniejsze w porównaniu do pojazdu pochodzącego z 1993 roku. Różnica pomiędzy odkształceniami przedstawia się następująco:

- a) prawa strona – 216 [mm],
- b) środek – 22 [mm],
- c) lewa strona – 336 [mm].

Obliczenia dotyczące energii kinetycznej związanej z badanymi pojazdami (Bober, b.r.):

$$E_k = \frac{1}{2} * m * v^2,$$

gdzie: m – masa pojazdu, v – prędkość pojazdu w momencie zderzenia.

Energia kinetyczną nazywamy energią, którą posiada dane ciało poruszające się względem wybranego przez nas układu odniesienia. Na powyższym wzorze widoczne jest, że energia ta jest równa pracy, dzięki której doszło do nadania pędu ciału, oraz że jej wartość rośnie wraz ze wzrostem masy i kwadratu prędkości. Wynik zapisywany jest w dżulach [J]. Zgodnie z definicją 1 J jest równy 1 N przy przesunięciu miejsca przyłożenia siły o 1 m. Kierunek tego przesunięcia jest równoległy do kierunku działania siły. Zależność ta może zostać zobrazowana poniższym wzorem (Bober, b.r.):

$$1 \text{ [J]} = \frac{\text{kg} * \text{m}^2}{\text{s}^2} = 1 \text{ [N]} * 1 \text{ [m]}.$$

Energia kinetyczna w przypadku pojazdów marki Ford model F150:

$$\text{a) } 1993: E_k = \frac{1}{2} * 2301 \text{ [kg]} * 15,64 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 17 \ 993,82 \text{ [J]},$$

$$\text{b) } 2015: E_k = \frac{1}{2} * 2427 \text{ [kg]} * 15,67 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 19 \ 015,55 \text{ [J]}.$$

Energia kinetyczna w przypadku modelu wyprodukowanego w 2015 roku jest większa o 1021,73 J w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1993 roku.

Obliczenia pozwalające na ustalenie średniej głębokości deformacji w pojazdach po zderzeniu mogą zostać wykonane przy użyciu poniższego wzoru (Sztwiertnia, Guzek, Januła, 2017: 4):

$$C_{sr} = \left[\frac{C_1}{2} + \sum_{i=2}^{i=n-1} C_i + \frac{C_n}{2} \right] : (n - 1),$$

gdzie: C_1 – pierwszy punkt pomiaru, C_i – głębokość deformacji w i -tym punkcie pomiaru, C_n – n -ty punkt pomiaru, n – liczba punktów pomiarowych.

Na potrzeby niniejszej pracy został on zmodyfikowany do następującej postaci:

$$D_{sr} = \left[\frac{D_p \text{ [mm]}}{2} + \sum_{i=2}^{i=n-1} D_o \text{ [mm]} + \frac{D_l \text{ [mm]}}{2} \right] : (n - 1),$$

gdzie: D_p – deformacja po prawej stronie, D_o – deformacja po środku, D_l – deformacja po lewej stronie, n – liczba punktów deformacji (w niniejszej pracy 3 punkty).

Co po przekształceniu może zostać zapisane w następującej postaci:

$$D_{\text{śr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{D_p [\text{mm}]}{2} + D_o [\text{mm}] + \frac{D_l [\text{mm}]}{2} \right].$$

Średnia głębokość deformacji w przypadku pojazdów marki Ford model Mustang:

$$\text{a) 1993: } D_{\text{śr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{550 [\text{mm}]}{2} + 650 [\text{mm}] + \frac{670 [\text{mm}]}{2} \right] = 630 [\text{mm}],$$

$$\text{b) 2015: } D_{\text{śr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{334 [\text{mm}]}{2} + 628 [\text{mm}] + \frac{334 [\text{mm}]}{2} \right] = 481 [\text{mm}].$$

Uśredniona głębokość deformacji wykorzystywana jest do oceny uszkodzeń w przypadku, gdy co najmniej jeden z wyników uzyskanych podczas porównywania okazał się większy od poprzedniego (w niniejszej pracy zaprezentowane zostały takie przypadki).

Obliczenia pozwalają na określenie zmian w wymiarach pojazdów pod wpływem odkształcenia plastycznego na zimno. Wynik ten wyrażony w procentach obrazuje ubytek w całym pojeździe i do jego wyliczenia można użyć poniższego wzoru (*Zgniot i rekrytalizacja metali*, b.r.):

$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100\%,$$

gdzie: S_0 – kształt przed zderzeniem, S – kształt po zderzeniu.

Na potrzeby niniejszej pracy wzór został zmodyfikowany do następującej postaci:

$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} * \left[\frac{WA_l + WA_s + \frac{WA_p}{2}}{2} \right] - \left[\frac{1}{2} * \left[\frac{WB_l + WB_s + \frac{WB_p}{2}}{2} \right] \right] \right]}{\frac{1}{2} * \left[\frac{WA_l + WA_s + \frac{WA_p}{2}}{2} \right]} * 100\%,$$

gdzie: WA_l – wielkość pojazdu po lewej stronie przed zderzeniem [mm], WA_s – wielkość pojazdu po środku przed zderzeniem [mm], WA_p – wielkość pojazdu po prawej stronie przed zderzeniem [mm], WB_l – wielkość pojazdu po lewej stronie po zderzeniu [mm], WB_s – wielkość pojazdu po środku po zderzeniu [mm], WB_p – wielkość pojazdu po prawej stronie po zderzeniu [mm].

Modyfikacja ta była obowiązkowa ze względu na występowanie 3 punktów, w których dokonano pomiarów (lewa strona, środek, prawa strona), co stworzyło konieczność wyciągnięcia długości uśrednionej dla pojazdów przed oraz po zderzeniu.

Zmiana procentowa w wymiarach pojazdów marki Ford model F150:

a) 1993:

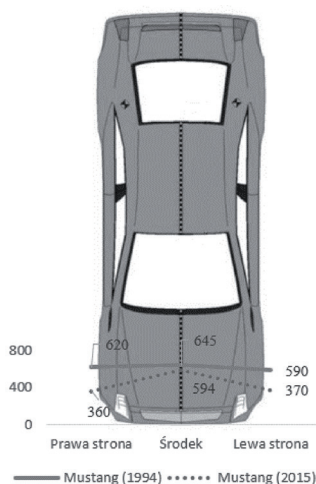
$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} * \left[\frac{5340}{2} + 5350 + \frac{5540}{2} \right] - \left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4790}{2} + 4700 + \frac{4870}{2} \right] \right] \right]}{\frac{1}{2} * \left[\frac{5340}{2} + 5350 + \frac{5540}{2} \right]} * 100 [\%] = 11,68 [\%],$$

b) 2015:

$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} * \left[\frac{5390}{2} + 5886 + \frac{5390}{2} \right] \right] - \left[\frac{1}{2} * \left[\frac{5056}{2} + 5258 + \frac{5056}{2} \right] \right]}{\frac{1}{2} * \left[\frac{5390}{2} + 5886 + \frac{5390}{2} \right]} * 100 [\%] = 8,53 [\%].$$

W przypadku pojazdu wyprodukowanego w 2015 roku średnia wartość procentowa deformacji jest mniejsza o 149 mm w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1993 roku, co przełożyło się na zmianę w procentach wynoszącą 3,15%. W związku z tym w przypadku tego modelu nasuwa się jeden ważny wniosek – pochodzący z 2015 roku samochód uległ mniejszym odkształceniom w porównaniu z tym samym modelem wyprodukowanym w 1993 roku.

Odkształcenia dla pojazdów marki Ford model Mustang pochodzących z 1994 roku oraz 2015 roku:



Rysunek 2. Zilustrowanie obrażeń poniesionych przez samochody Ford Mustang podczas zderzeń czołowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie Report number: CAL-94-N08, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Ford Motor Company, 1994 Ford Mustang, s. 11 (2–4) oraz Report number: NCAP-KAR-15-022, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Ford Motor Co., 2015 Ford Mustang, s. 25–26 (21–22).

Skutki uderzenia czołowego w nowszym pojeździe wyprodukowanym w 2015 roku były ponownie mniejsze w porównaniu do pojazdu pochodzącego z 1994 roku. Różnica pomiędzy odkształceniami przedstawia się następująco:

- a) prawa strona – 260 mm,
- b) środek – 51 mm,
- c) lewa strona – 220 mm.

Ponownie, tak jak w przypadku poprzedniego modelu nasuwa się jeden ważny wniosek – pochodzący z 2015 roku samochód uległ mniejszym odkształceniom w porównaniu z tym samym modelem wyprodukowanym w 1994 roku.

Energia kinetyczna w przypadku pojazdów marki Ford model Mustang:

$$a) 1994: E_k = \frac{1}{2} * 1608 \text{ [kg]} * 15,64 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 12\,574,56 \text{ [J]},$$

$$b) 2015: E_k = \frac{1}{2} * 1771,8 \text{ [kg]} * 15,64 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 13\,855,48 \text{ [J]}.$$

Energia kinetyczna w przypadku modelu wyprodukowanego w 2015 roku jest większa o 1280,92 J w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1994 roku.

Średnia głębokość deformacji w przypadku pojazdów marki Ford model Mustang:

$$a) 1994: D_{\text{śr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{620 \text{ [mm]}}{2} + 645 \text{ [mm]} + \frac{590 \text{ [mm]}}{2} \right] = 625 \text{ [mm]},$$

$$b) 2015: D_{\text{śr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{360 \text{ [mm]}}{2} + 594 \text{ [mm]} + \frac{370 \text{ [mm]}}{2} \right] = 479,5 \text{ [mm]}.$$

Zmiana procentowa w wymiarach pojazdów marki Ford model Mustang:

a) 1994:

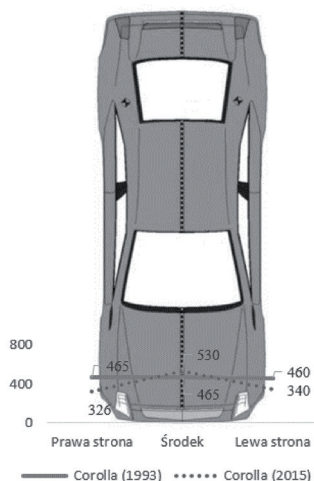
$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4530}{2} + 4605 + \frac{4515}{2} \right] \right] - \left[\frac{1}{2} * \left[\frac{3910}{2} + 3960 + \frac{3925}{2} \right] \right]}{\frac{1}{2} * \left[\frac{4530}{2} + 4605 + \frac{4515}{2} \right]} * 100 \text{ [%]} = 13,69 \text{ [%]},$$

b) 2015:

$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4050}{2} + 4790 + \frac{4045}{2} \right] \right] - \left[\frac{1}{2} * \left[\frac{3690}{2} + 4196 + \frac{3675}{2} \right] \right]}{\frac{1}{2} * \left[\frac{4050}{2} + 4790 + \frac{4045}{2} \right]} * 100 \text{ [%]} = 10,85 \text{ [%]}.$$

W przypadku pojazdu wyprodukowanego w 2015 roku średnia wartość procentowa deformacji jest mniejsza o 145,5 mm w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1994 roku, co przełożyło się na zmianę w procentach wynoszącą 2,84%. W związku z tym w przypadku tego modelu nasuwa się jeden ważny wniosek – pochodzący z 2015 roku samochód uległ mniejszym odkształceniom w porównaniu z tym samym modelem wyprodukowanym w 1994 roku.

Odształcenia dla pojazdów Honda model Civic pochodzących z 1994 roku oraz 2015 roku:



Rysunek 3. Zilustrowanie obrażeń poniesionych przez samochody Honda Civic podczas zderzeń czołowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie Report number: TRC-93-N12, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Honda Motor Co. LTD., 1994 Honda Civic, s. 19 (2–6) oraz Report number: NCAP-MGA-2016-045, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Honda Mfg. of Indiana LLC., 2016 Honda Civic LX, s. 25–26 (21–22).

Skutki uderzenia czołowego w nowszym pojeździe wyprodukowanym w 2015 roku były ponownie mniejsze w porównaniu do pojazdu pochodzącego z 1994 roku. Różnica pomiędzy odkształceniami przedstawia się następująco:

- a) prawa strona – 189 mm,
- b) środek – 214 mm,
- c) lewa strona – 121 mm.

Ponownie, tak jak w przypadku poprzedniego modelu nasuwa się jeden ważny wniosek – pochodzący z 2015 roku samochód uległ mniejszym odkształceniom w porównaniu z tym samym modelem wyprodukowanym w 1994 roku.

Energia kinetyczna w przypadku pojazdów marki Honda model Civic:

$$\text{a) 1994: } E_k = \frac{1}{2} * 1249 \text{ [kg]} * 15,56 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 9\,717,22 \text{ [J]},$$

$$\text{b) 2016: } E_k = \frac{1}{2} * 1436,5 \text{ [kg]} * 15,58 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 11\,186,44 \text{ [J]}.$$

Energia kinetyczna w przypadku modelu wyprodukowanego w 2016 roku jest większa o 1469,22 J w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1994 roku.

Średnia głębokość deformacji w przypadku pojazdów marki Honda model Civic:

$$\text{a) 1994: } D_{\text{sr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{495 \text{ [mm]}}{2} + 640 \text{ [mm]} + \frac{465 \text{ [mm]}}{2} \right] = 560 \text{ [mm]},$$

$$\text{b) 2016: } D_{\text{sr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{306 \text{ [mm]}}{2} + 426 \text{ [mm]} + \frac{344 \text{ [mm]}}{2} \right] = 375,5 \text{ [mm]}.$$

Zmiana procentowa w wymiarach pojazdów marki Honda model Civic:

a) 1994:

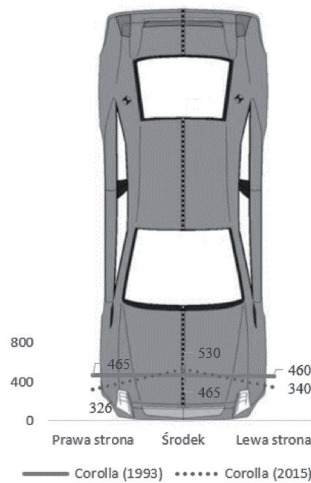
$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4225}{2} + 4385 + \frac{4230}{2} \right] \right] - \left[\frac{1}{2} * \left[\frac{3730}{2} + 3745 + \frac{3765}{2} \right] \right]}{\frac{1}{2} * \left[\frac{4225}{2} + 4385 + \frac{4230}{2} \right]} * 100 [\%] = 13 [\%],$$

b) 2016:

$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4418}{2} + 4605 + \frac{4418}{2} \right] \right] - \left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4112}{2} + 4179 + \frac{4074}{2} \right] \right]}{\frac{1}{2} * \left[\frac{4418}{2} + 4605 + \frac{4418}{2} \right]} * 100 [\%] = 8,32 [\%].$$

W przypadku pojazdu wyprodukowanego w 2016 roku średnia wartość procentowa deformacji jest mniejsza o 184,5 mm w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1994 roku, co przełożyło się na zmianę w procentach wynoszącą 4,68%. W związku z tym w przypadku tego modelu nasuwa się jeden ważny wniosek – pochodzący z 2016 roku samochód uległ mniejszym odkształceniom w porównaniu z tym samym modelem wyprodukowanym w 1994 roku.

Odształcenia dla pojazdów Toyota model Corolla pochodzących z 1993 roku oraz 2015 roku:



Rysunek 4. Zilustrowanie obrażeń poniesionych przez samochody Toyota Corolla podczas zderzeń czołowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie Report number: MSE-94-N01, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Toyota Motor Corporation, 1994 Toyota Corolla, s. 12 (7) oraz Report number: NCAP-TRC-15-002, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Toyota Motor Corporation, 2015 Toyota Corolla, s. 24–25 (21–22).

Skutki uderzenia czołowego w nowszym pojeździe wyprodukowanym w 2015 roku zdecydowanie nie były mniejsze w porównaniu do pojazdu pochodzącego z 1993 roku, w szczególności jeżeli chodzi o środek pojazdu. Różnica pomiędzy odkształceniami przedstawia się następująco:

- a) prawa strona – 139 mm,
- b) środek – wzrost o 65 mm,
- c) lewa strona – 120 mm.

W przypadku tego modelu nasuwa się jeden ważny wniosek – pochodzący z 2015 roku samochód uległ większym odkształceniom w jednym punkcie (środek) w porównaniu z tym samym modelem wyprodukowanym w 1993 roku. Jest to pierwszy model, w którym obserwowany jest wzrost wartości.

Energia kinetyczna w przypadku pojazdów marki Toyota model Corolla:

$$a) 1993: E_k = \frac{1}{2} * 1352 \text{ [kg]} * 15,61 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 10\,552,36 \text{ [J]},$$

$$b) 2015: E_k = \frac{1}{2} * 1480 \text{ [kg]} * 15,67 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 11\,595,8 \text{ [J]}.$$

Energia kinetyczna w przypadku modelu wyprodukowanego w 2015 roku jest większa o 1043,44 J w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1993 roku.

Średnia głębokość deformacji w przypadku pojazdów marki Toyota model Corolla:

$$a) 1993: D_{\text{śr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{465 \text{ [mm]}}{2} + 465 \text{ [mm]} + \frac{460 \text{ [mm]}}{2} \right] = 463,75 \text{ [mm]},$$

$$b) 2015: D_{\text{śr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{326 \text{ [mm]}}{2} + 530 \text{ [mm]} + \frac{340 \text{ [mm]}}{2} \right] = 431,5 \text{ [mm]}.$$

Zmiana procentowa w wymiarach pojazdów marki Toyota model Corolla:

a) 1993:

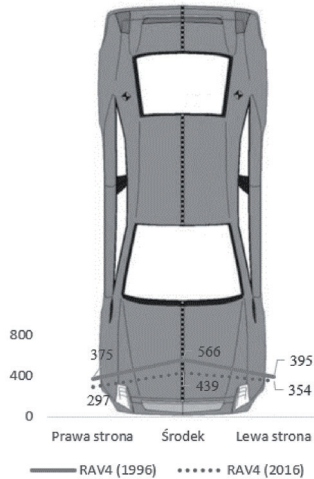
$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4270}{2} + 4372 + \frac{4270}{2} \right] - \left[\frac{1}{2} * \left[\frac{3805}{2} + 3907 + \frac{3810}{2} \right] \right] \right]}{\frac{1}{2} * \left[\frac{4270}{2} + 4372 + \frac{4270}{2} \right]} * 100 \text{ [%]} = 10,73 \text{ [%]},$$

b) 2015:

$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4395}{2} + 4630 + \frac{4390}{2} \right] - \left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4069}{2} + 4100 + \frac{4050}{2} \right] \right] \right]}{\frac{1}{2} * \left[\frac{4395}{2} + 4630 + \frac{4390}{2} \right]} * 100 \text{ [%]} = 9,56 \text{ [%]}.$$

W przypadku pojazdu wyprodukowanego w 2015 roku średnia wartość procentowa deformacji jest mniejsza o 32,25 mm w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1993 roku, co przełożyło się na zmianę w procentach wynoszącą 1,17%. W związku z tym w przypadku tego modelu nasuwa się jeden ważny wniosek – pochodzący z 2015 roku samochód uległ mniejszym odkształceniom w porównaniu z tym samym modelem wyprodukowanym w 1993 roku.

Odształcenia dla pojazdów Toyota model RAV4 pochodzących z 1996 roku oraz 2015 roku:



Rysunek 5. Zilustrowanie obrażeń poniesionych przez samochody Toyota RAV4 podczas zderzeń czołowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie Report number: NCAP-TRC-97-003, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Toyota Motor Corporation, 1997 Toyota RAV4, s. 19 (2–6) oraz Report number: NCAP-CAL-15-003, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Toyota Motor Corporation, 2015 Toyota RAV-4, s. 25–26 (2–19–2–20).

Skutki uderzenia czołowego w nowszym pojeździe wyprodukowanym w 2016 roku były mniejsze w porównaniu do pojazdu pochodzącego z 1993 roku. Różnica pomiędzy odkształceniami przedstawia się następująco:

- a) prawa strona – 78 mm,
- b) środek – 127 mm,
- c) lewa strona – 41 mm.

W przypadku tego modelu nasuwa się jeden ważny wniosek – pochodzący z 2016 roku samochód uległ mniejszym odkształceniom w porównaniu z tym samym modelem wyprodukowanym w 1996 roku.

Energia kinetyczna w przypadku pojazdów marki Toyota model RAV4:

$$\text{a) } 1996: E_k = \frac{1}{2} * 1651 \text{ [kg]} * 15,56 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 12\,844,78 \text{ [J]},$$

$$\text{b) } 2014: E_k = \frac{1}{2} * 1845 \text{ [kg]} * 15,64 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 14\,434,16 \text{ [J]}.$$

Energia kinetyczna w przypadku modelu wyprodukowanego w 2014 roku jest większa o 1589,38 J w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1996 roku.

Średnia głębokość deformacji w przypadku pojazdów marki Toyota model RAV4:

$$\text{a) } 1996: D_{\text{sr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{375 \text{ [mm]}}{2} + 566 \text{ [mm]} + \frac{395 \text{ [mm]}}{2} \right] = 475,5 \text{ [mm]},$$

$$\text{b) } 2014: D_{\text{sr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{297 \text{ [mm]}}{2} + 439 \text{ [mm]} + \frac{354 \text{ [mm]}}{2} \right] = 382,25 \text{ [mm]}.$$

Zmiana procentowa w wymiarach pojazdów marki Toyota model RAV4:

a) 1996:

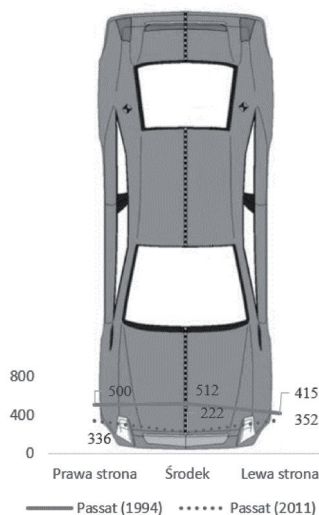
$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} \left[\frac{4005}{2} + 4177 + \frac{3999}{2} \right] \right] - \left[\frac{1}{2} \left[\frac{3630}{2} + 3611 + \frac{3604}{2} \right] \right]}{\frac{1}{2} \left[\frac{4005}{2} + 4177 + \frac{3999}{2} \right]} * 100 [\%] = 11,62 [\%],$$

b) 2014:

$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} \left[\frac{4340}{2} + 4565 + \frac{4345}{2} \right] \right] - \left[\frac{1}{2} \left[\frac{4043}{2} + 4126 + \frac{3991}{2} \right] \right]}{\frac{1}{2} \left[\frac{4340}{2} + 4565 + \frac{4345}{2} \right]} * 100 [\%] = 8,58 [\%].$$

W przypadku pojazdu wyprodukowanego w 2014 roku średnia wartość procentowa deformacji jest mniejsza o 93,25 mm w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1996 roku, co przełożyło się na zmianę w procentach wynoszącą 3,04%. W związku z tym w przypadku tego modelu nasuwa się jeden ważny wniosek – pochodzący z 2014 roku samochód uległ mniejszym odkształceniom w porównaniu z tym samym modelem wyprodukowanym w 1996 roku.

Odkształcenia dla pojazdów Volkswagen model Passat pochodzących z 1994 roku oraz 2011 roku:



Rysunek 6. Zilustrowanie obrażeń poniesionych przez samochody Volkswagen Passat podczas zderzeń czołowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie Mga research corporation, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Volkswagen, 1995 Passat, MGA Reference no.: C94A-180, s. 31–33 (A–14–A–16) oraz Report number: NCAP-MGA-2012-029, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Volkswagen Group of America, 2012 Volkswagen Passat, s. 25–26 (21–22).

Skutki uderzenia czołowego w nowszym pojeździe wyprodukowanym w 2011 roku były mniejsze w porównaniu do pojazdu pochodzącego z 1994 roku. Różnica pomiędzy odkształceniami przedstawia się następująco:

- a) prawa strona – 164 mm,
- b) środek – 290 mm,
- c) lewa strona – 63 mm.

W przypadku tego modelu nasuwa się jeden ważny wniosek – pochodzący z 2011 roku samochód uległ mniejszym odkształceniom w porównaniu z tym samym modelem wyprodukowanym w 1994 roku.

Energia kinetyczna w przypadku pojazdów marki Volkswagen model Passat:

- a) 1994: $E_k = \frac{1}{2} * 1650 \text{ [kg]} * 15,56 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 12\,837 \text{ [J]}$,
- b) 2011: $E_k = \frac{1}{2} * 1762 \text{ [kg]} * 15,64 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 13\,780,40$

Energia kinetyczna w przypadku modelu wyprodukowanego w 2011 roku jest większa o 943,4 J w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1994 roku.

Średnia głębokość deformacji w przypadku pojazdów marki Volkswagen model Passat:

- a) 1994: $D_{\text{śr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{500 \text{ [mm]}}{2} + 512 \text{ [mm]} + \frac{415 \text{ [mm]}}{2} \right] = 484,75 \text{ [mm]}$,
- b) 2011: $D_{\text{śr}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{336 \text{ [mm]}}{2} + 222 \text{ [mm]} + \frac{352 \text{ [mm]}}{2} \right] = 283 \text{ [mm]}$.

Zmiana procentowa w wymiarach pojazdów marki Volkswagen model Passat:

a) 1994:

$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4420}{2} + 4885 + \frac{4410}{2} \right] \right] - \left[\frac{1}{2} * \left[\frac{3920}{2} + 4373 + \frac{3995}{2} \right] \right]}{\frac{1}{2} * \left[\frac{4420}{2} + 4885 + \frac{4410}{2} \right]} * 100 \text{ [%]} = 8,38 \text{ [%]},$$

b) 2011:

$$Z = \frac{\left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4701}{2} + 4576 + \frac{4701}{2} \right] \right] - \left[\frac{1}{2} * \left[\frac{4365}{2} + 4354 + \frac{4349}{2} \right] \right]}{\frac{1}{2} * \left[\frac{4701}{2} + 4576 + \frac{4701}{2} \right]} * 100 \text{ [%]} = 6,10 \text{ [%]}.$$

W przypadku pojazdu wyprodukowanego w 2011 roku średnia wartość procentowa deformacji jest mniejsza o 201,75 mm w porównaniu z pojazdem wyprodukowanym w 1994 roku, co przełożyło się na zmianę w procentach wynoszącą 2,28%. W związku z tym w przypadku tego modelu nasuwa się jeden ważny wniosek – pochodzący z 2011 roku samochód uległ mniejszym odkształceniom w porównaniu z tym samym modelem wyprodukowanym w 1994 roku.

Wnioski końcowe

We wszystkich pojazdach wyprodukowanych w XXI wieku widoczne jest zmniejszenie odkształcenia przedniej części samochodu. Jedyne wzrost mierzonej wartości

dla jednego punktu (oś) miał miejsce w przypadku pojazdu marki Toyota model Corolla z 2015 roku, gdzie pojazd uległ odkształceniu o 65 mm większemu w porównaniu z tym samym modelem pochodzącym z 1993 roku. Stąd też autorzy w celu zwiększenia dokładności zdecydowali się na obliczenie średniej głębokości deformacji dla każdego z samochodów. Oprócz zmniejszenia średniego odkształcenia dla każdego pojazdu zauważalny jest wzrost energii kinetycznej uwalnianej podczas zderzenia z deformowalną barierą (średnia dla 6 przypadków: 1224,68 J), gdzie najwyższym wzrostem charakteryzował się samochód marki Toyota model RAV4 (wzrost o 1589,38 J), a najniższym – marki Volkswagen model Passat (różnica 943,4 J). Na tej podstawie można dojść do wniosku, że wzrost tejsze wartości nie zawsze jest równoznaczny ze wzrostem zniszczeń poczynionych wskutek zderzenia czołowego.

Zakończenie

Bezpieczeństwo pojazdów zaczęło być tematem społecznie ważnym dopiero w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku za sprawą amerykańskiego prawnika Ralpha Nadera (1934), który zdecydował się na opublikowanie maszynopisu pod tytułem *Niebezpieczne przy każdej prędkości* (ang. *Unsafe at any speed*). Krótco po tym w Stanach Zjednoczonych miała miejsce seria protestów, których celem było wywarcie presji na rządzie w celu stworzenia regulacji prawnych zwiększających bezpieczeństwo oraz zaostrezenia już istniejących. Od tego czasu minęło prawie 60 lat, co dowodzi, że elementy bezpieczeństwa nie zostały stworzone tylko i wyłącznie przez jedną osobę w jednej epoce. Jest to dziedzina techniki podlegająca nieustannemu rozwojowi. Dzięki archiwom tworzonym przez organizacje mające oceniać stopień zaawansowania pojazdów możliwa jest dokładna analiza zebranych wyników, które zostały przedstawione w niniejszej publikacji. Stąd też zawarte w poprzednim podrozdziale spostrzeżenia bronią, w ocenie autorów, hipotezy zawartej we wstępie – pojazdy produkowane współcześnie, pomimo zwiększonej masy własnej, a przez to większej energii kinetycznej uwalnianej podczas zderzenia czołowego, potrafią ulegać mniejszym odkształceniom nadwozia.

Bibliografia

- Bober L. (b.r.), *Energia kinetyczna*, <https://leszekbober.pl/fizyka/praca-moc-energia/energia-kinetyczna> [dostęp: 23.06.2021].
- Owczarz M., Witkiewicz M., Taryma S., Jerszow Ł. (2014), *Badanie zależności pomiędzy deformacją powypadkową a prędkością kolizyjną samochodów osobowych w chwili początkowej zderzenia*, „Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy transportowe”, nr 6.

Sztwiertnia K., Guzek M., Januła J. (2017), *Niepewność w określeniu prędkości EES zderzenia samochodów wyznaczonej metodą eksperymentalno-analityczną*, Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej, Politechnika Warszawska, Warszawa.

Zgmiot i rekrytalizacja metali (b.r.), https://mech.pg.edu.pl/documents/4566477/14063406/tem_2_energetyka_opis1.pdf [dostęp: 23.06.2021].

Raporty zderzeń (podane zostały nazwy angielskie)

Ford F150:

Report number: MSE-94-04, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Ford Motor Company, 1994 Ford F150 Pickup.

Report number: NCAP-MGA-2015-061, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Ford Motor Co., 2015 Ford F-150 SuperCab XL 4x4.

Ford Mustang:

Report number: CAL-94-N08, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Ford Motor Company, 1994 Ford Mustang.

Report number: NCAP-KAR-15-022, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Ford Motor Co., 2015 Ford Mustang.

Honda Civic:

Report number: TRC-93-N12, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Honda Motor Co. LTD., 1994 Honda Civic.

Report number: NCAP-MGA-2016-045, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Honda Mfg. of Indiana LLC., 2016 Honda Civic LX.

Toyota Corolla:

Report number: MSE-94-N01, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Toyota Motor Corporation, 1994 Toyota Corolla.

Report number: NCAP-TRC-15-002, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Toyota Motor Corporation, 2015 Toyota Corolla.

Toyota RAV4:

Report number: NCAP-TRC-97-003, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Toyota Motor Corporation, 1997 Toyota RAV4.

Report number: NCAP-CAL-15-003, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Toyota Motor Corporation, 2015 Toyota RAV-4.

Volkswagen Passat:

Mga research corporation, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Volkswagen, 1995 Passat, MGA Reference no.: C94A-180.

Report number: NCAP-MGA-2012-029, New Car Assessment Program, Frontal barrier impact test, Volkswagen Group of America, 2012 Volkswagen Passat.

Summary**Vehicle deformation in frontal collision – comparative analysis of the results of crash tests of models manufactured in 1993–1997 and 2011–2015**

The aim of this publication is to verify the following hypothesis: modern vehicles, despite the increased curb weight, and thus greater kinetic energy released during a frontal collision, can undergo less body deformation. This conclusion is drawn on the basis of twelve crash test reports conducted by the American organization NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration). Six of them were prepared for cars manufactured in the last decade of the 20th century, the rest for vehicles manufactured in 2011–2015. It was possible to compare the deformation depth for these vehicles and to make calculations taking into account such parameters as: released kinetic energy, percentage change in the total length of vehicles and the average deformation depth.

Keywords: vehicle deformation, frontal collision, crumple zone, vehicle safety