



**Jakub  
Zębala**



**Karol  
Kwieciński**

## Oszacowanie wartości EES samochodu osobowego przy wykorzystaniu metody elementów skończonych

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń parametru EES (prędkości równoważnej energii deformacji) samochodu osobowego uszkodzonego w wyniku zderzenia z nietypową przeszkodą, jaką stanowił tył ładowarki kołowej. W obliczeniach zastosowano dostępną w programie PC-Crash metodę elementów skończonych (MES). Wykazano, że metoda elementów skończonych może być z powodzeniem stosowana w tego typu przypadkach. Zauważono również, że sztywność przedniej szyby modelu strukturalnego samochodu osobowego ma nadmiernie duży wpływ na deformację dachu i wartość parametru EES oraz zaproponowano uproszczenie modelu przez usunięcie szyby.

### Słowa kluczowe

EES, MES, metoda elementów skończonych, PC-Crash.

\* \* \*

### 1. Wprowadzenie

Przedstawione w artykule rozważania oparto na przykładzie zderzenia, w którym Opel Calibra wjechał pod tył ładowarki kołowej Ł-34 (ryc. 1). W tylnej części ładowarki nie było odpowiedniej belki zabezpieczającej przed wjazdem, dlatego po wjechaniu Opla pod ładowarkę doszło do powstania głębokich uszkodzeń zarówno górnej jak i dolnej części samochodu (ryc. 2 i 3).



Ryc. 1. Ładowarka kołowa Ł-34.

Dr inż. Jakub Zębala, Instytut Ekspertyz Sądowych, Kraków.  
Mgr inż. Karol Kwieciński, Instytut Ekspertyz Sądowych, Kraków.

## z problemów rekonstrukcji wypadków i opiniowania

Uszkodzenia górnej części samochodu obejmowały: pokrywę komory silnika, błotniki, silnik (zerwana pokrywa zaworów), przednie słupki, podszycie oraz szyby przednią i boczne (ryc. 2). Uszkodzenia te powstały od uderzenia w płytę i belkę znajdujące się w tylnej części ładowarki (ryc. 1).



*Ryc. 2. Uszkodzenia górnej części nadwozia Opla powstałe po wjechaniu pod belkę i płytę ładowarki kołowej.*

W dolnej części pojazdu uszkodzony został zderzak i podłużnica po lewej stronie oraz przednie zawieszenie (ryc. 3). Uszkodzenia te były skutkiem kontaktu z tylnym kołem ładowarki.



*Ryc. 3. Uszkodzenie na poziomie zderzaka powstałe na skutek uderzeniu w tylne koło ładowarki kołowej.*

W czasie bezpośrednich pomiarów ustalono, że głębokość trwałych deformacji samochodu Opel, zlokalizowanych w jego górnej części, wynosiła ok. 1,7 m (mierząc od najdalej wysuniętego do przodu obrysu nieuszkodzonego pojazdu), natomiast w dolnej części ok. 0,35 m (mierząc na wysokości zderzaka od obrysu nieuszkodzonego zderzaka w tym miejscu). Po wypadku na ładowarce nie ujawniono żadnych uszkodzeń pochodzących od samochodu Opel.

### 2. Obliczanie wartości EES

#### 2.1. Siatka energii deformacji dachu

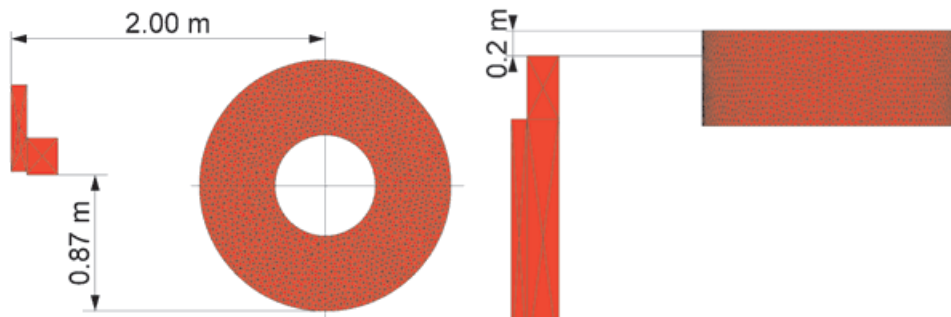
Jedną z metod obliczenia parametru EES pojazdu, który wjechał pod sztywną przeszkodę jest metoda oparta na siatce energii deformacji dachu, zwanej też macierzą wskaźników uszkodzenia (*Damage Index Matrix*) [1, 2]. Metody tej w przedstawionym zderzeniu nie można było jednak zastosować, ponieważ uszkodzenia dachu samochodu Opel stanowiły wyłącznie niewielką część wszystkich uszkodzeń. Zasadnicze uszkodzenia powstały w górnej i lewej części przodu pojazdu.

#### 2.2. Bazy danych

Drugą, powszechnie stosowaną metodą w określeniu parametru EES, jest poszukiwanie w bazach danych zbliżonych przypadków. W tym celu wykonano kwerendę dostępnych baz danych zawierających informacje o prędkości zderzeniowej i wartości EES [3, 4, 5, 6], poszukując testów zderzeniowych, w którym samochód osobowy po wjechaniu pod sztywną przeszkodę miałby zbliżone uszkodzenia. W bazie danych Reckon Data opisany jest test [5], w którym samochód Volkswagen Golf wjechał z prędkością ok. 60 km/h pod prawy bok samochodu ciężarowego, pomiędzy kołami przedniej i tylnej osi. Uszkodzenia samochodu Volkswagen w jego górnej części były porównywalne do uszkodzeń samochodu Opel, ale uszkodzenia w dolnej części obu pojazdów różniły się istotnie między sobą. W samochodzie Volkswagen nie doszło do uszkodzenia zderzaka, podłużnicy i przedniego koła, ponieważ na tym poziomie w samochodzie ciężarowym nie było żadnych elementów mogących spowodować takie deformacje. Różnice w zakresie uszkodzeń tych pojazdów pozwoliły jedynie na oszacowanie prędkości zderzeniowej samochodu Opel jako nie mniejszej niż 60 km/h.

#### 2.3. Metoda elementów skończonych w programie PC-Crash

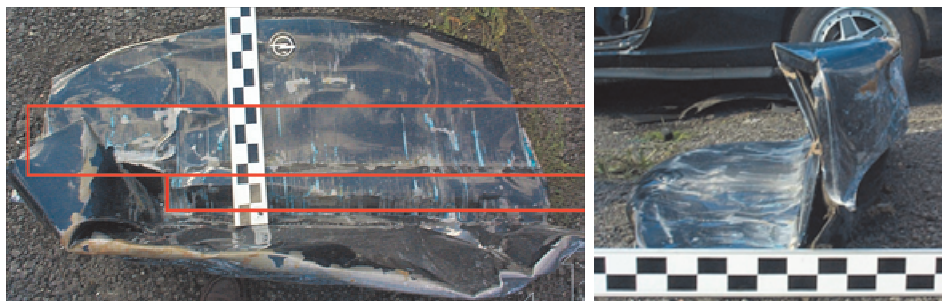
Istnieje również możliwość wykonania obliczeń parametru EES w programie PC-Crash. W aktualnej wersji programu PC-Crash 13.0 znajduje się niewielka ilość modeli strukturalnych umożliwiających prowadzenie obliczeń przy wykorzystaniu metody MES. Nie ma w nim ani modelu samochodu Opel Calibra ani odpowiedniego modelu ładowarki. W analizowanym przypadku zamiast samochodu Opel wybrano do obliczeń model samochodu Ford Taurus z 1998 r., ponieważ ze wszystkich modeli dostępnych w programie był on najbardziej zbliżony do Opla. Model ładowarki ograniczono do zaprojektowania w programie Gmsh wyłącznie jej tylnej części, tj. płyty, belki i tylnego koła. Płytę i belkę zaprojektowano ze sztywnych i nieodkształcalnych elementów, natomiast tylne koło ładowarki zaprojektowano jako sztywną powłokę, której wymiary odpowiadały szerokości i średnicy opony ładowarki o rozmiarze 23,5 R25. Usytuowanie tych elementów w modelu było zgodne z konstrukcją tylnej części ładowarki (ryc. 4).



Ryc. 4. Model tylnej części ładowarki – położenie belki i płyty względem koła.

### 3. Symulacja w programie PC-Crash

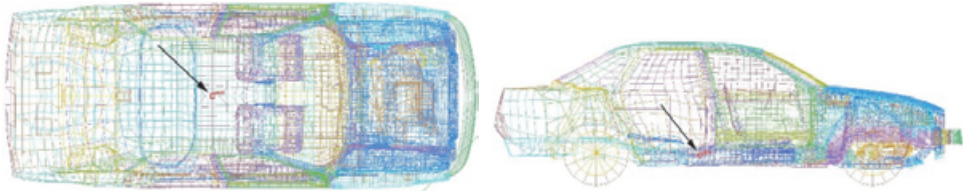
Ślady na pokrywie komory silnika samochodu Opel (ryc. 5) w powiązaniu z konstrukcją tylnej części ładowarki, pozwoliły na precyzyjne ustalenie względnego usytuowania modelu tylnej części ładowarki i modelu Forda. Położenie belki i płyty względem podłoża dobrano w sposób odpowiedni dla wysokości położenia elementów przedniej części modelu strukturalnego samochodu osobowego w odniesieniu do lokalizacji uszkodzeń przedniej części samochodu Opel.



Ryc. 5. Ślady na pokrywie komory silnika powstałe od płyty i belki. Po lewej stronie zaznaczono położenie belki i płyty ładowarki w czasie zderzenia.

Dysponując gotowym modelem strukturalnym samochodu osobowego i zaprojektowanym tyłem ładowarki, zdefiniowano warunki początkowe i wykonano symulacje zderzenia. W symulacjach model ładowarki stanowił nieporuszającą się, nieprzesuwną i nieodkształcalną przeszkodę. Zmieniano natomiast prędkość początkową samochodu osobowego, począwszy od wartości 60 km/h z krokiem co 5 km/h, aż do osiągnięcia deformacji górnej jego części ponad 1,7 m i dolnej (na wysokości zderzaka), przekraczającej 0,35 m. W czasie symulacji model samochodu nie był hamowany ani przyspieszany i przemieszczał się z początkowo przyjętą prędkością. Przyjęty w symulacjach czas obliczeniowy (130 ms) zapewniał

wjazd pod ładowarkę do osiągnięcia prędkości wzdłużnej modelu samochodu równej zero. Na marginesie można wspomnieć, że zrealizowanie jednej symulacji, czyli 130 ms zderzenia, na średniej klasy komputerze, wymaga kilku godzin obliczeń. Zmianę prędkości wzdłużnej modelu samochodu w czasie obliczeń rejestrowano w wybranym węzle nadwozia o numerze 10890, który nie podlegał bezpośredniemu działaniu sił odkształcających (ryc. 6).

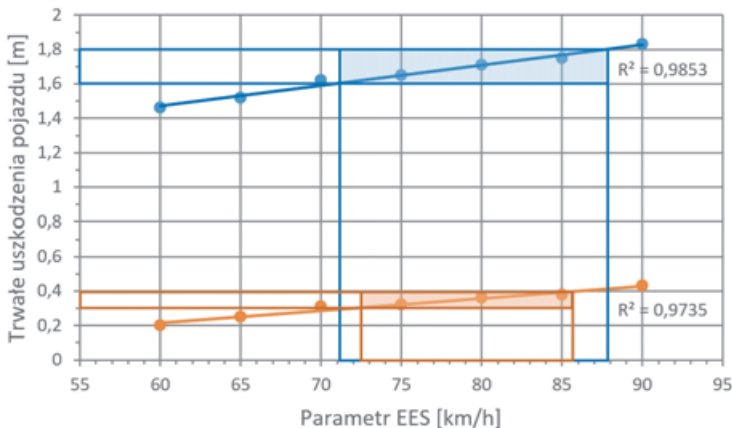


Ryc. 6. Usytuowanie węzła o numerze 10890.

#### 4. Analiza wyników symulacji

Wyniki symulacji przedstawiono w formie wykresu obrazującego zależność trwałych deformacji w funkcji parametru EES (ryc. 7) oraz dodatkowo w formie graficznej (załącznik nr 1). Wyniki, w postaci pojedynczych punktów aproksymowano funkcją liniową, dla której uzyskano wysoki stopień korelacji.

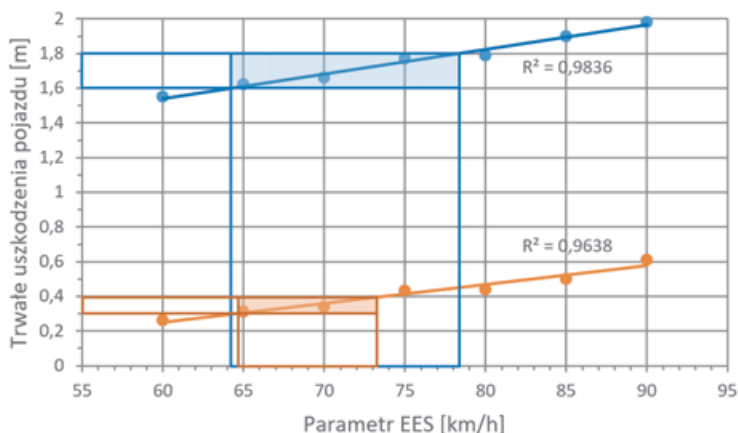
Uwzględniając niepewność pomiaru głębokości deformacji, szacowaną na  $\pm 5\%$ , czyli przyjmując zakres deformacji 1,6–1,8 m ustalono, że wartość parametru EES mieściła się w przedziale 71–88 km/h dla wyżej zlokalizowanych uszkodzeń i 72–86 km/h dla niżej zlokalizowanych uszkodzeń.



Ryc. 7. Trwałe uszkodzenia modelu samochodu Ford w zależności od parametru EES.

Analizując deformacje modelu Forda (załącznik 1) można było zauważyć, że uzyskane w symulacji deformacje dachu odbiegały od rzeczywistych deformacji

dachu samochodu Opel. Różnica ta była efektem sztywności przedniej szyby, która nie uległa zniszczeniu i do końca symulacji powodowała odkształcanie dachu w kierunku pionowym, odmiennie niż było to w rzeczywistości. W związku z powyższym postawiono hipotezę, że przednia szyba w modelu samochodu Ford ma zbyt dużą sztywność. Poszukując metody usunięcia tej różnicy zastosowano w symulacjach zmodyfikowany model Forda, w którym usunięto przednią szybę. Po zastosowaniu w obliczeniach tak zmodyfikowanego modelu Forda uzyskano obraz uszkodzeń adekwatny do uszkodzeń samochodu Opel. Otrzymane wyniki obliczeń dla zmodyfikowanego modelu Forda przedstawiono na rycinie 8 i w postaci graficznej w załączniku nr 2. W zakresie trwałych uszkodzeń górnej części modelu samochodu Ford parametr EES mieścił się w przedziale 64–78 km/h, natomiast w zakresie trwałych uszkodzeń na wysokości zderzaka w przedziale 65–73 km/h (ryc. 8).



Ryc. 8. Trwałe uszkodzenia zmodyfikowanego modelu samochodu Ford w zależności od parametru EES.

### 5. Podsumowanie

Metodę elementów skończonych można zastosować do rozwiązania wielu problemów rekonstrukcyjnych, między innymi do określania wartości parametru EES samochodu osobowego, który zderzył się z pojazdem o nietypowej konstrukcji lub wjechał pod przeszkodę.

W modelach strukturalnych pojazdów, znajdujących się w bazie programu PC-Crash, występuje problem związany ze zbyt dużą sztywnością szyb, które nie pękają ani nie kruszą się, przez co przenoszą duże obciążenia na dalsze części pojazdu. Sytuacja taka skutkuje uzyskiwaniem w symulacji odmiennego zakresu de-

formacji dachu oraz zawyżonej wartości parametru EES. Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu jest przyjęcie założenia, że szyba przednia pęka na początku zderzenia i usunięcie jej z modelu przed rozpoczęciem obliczeń symulacyjnych.

### ***Bibliografia***

1. Trego, A., Enz, B., Head, D., Oshida, Y. (2003). A Scientific Approach to Tractor-Trailer Side Underride Analysis, SAE Technical Paper, No. 2003-01-0178, Warrendale PA, <https://doi.org/10.4271/2003-01-0178>.
2. Wach, W. (2012). Uderzenie przy wjeździe samochodu pod naczepę, *Paragraf na Drodze*, nr 3.
3. Baza danych University of Michigan, <https://deepblue.lib.umich.edu/discover>.
4. Baza danych dra Melegħa, (płyta CD).
5. Baza danych Recon Data, DSD Dr Steffan Datentechnik, Test No SH 02.75.
6. Baza danych NHTSA, <https://www.nhtsa.gov/research-data>.

\* \* \*

## Estimation of the EES value of a passenger car using the finite element method

### **Abstract**

In the article the results of calculations of the EES parameter (energy equivalent speed) of a passenger car damaged as a result of a collision with an atypical obstacle, such as the rear of the wheel loader are presented.

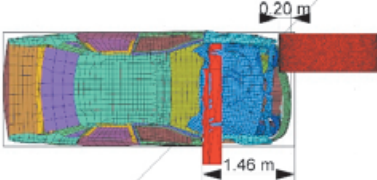
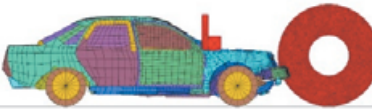
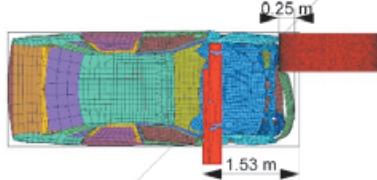
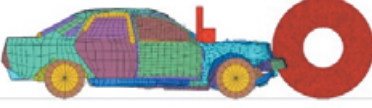
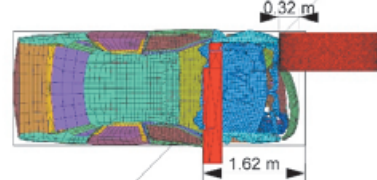
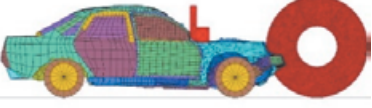
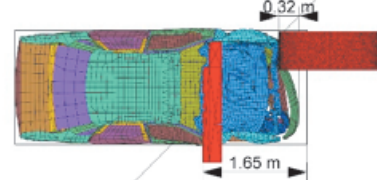
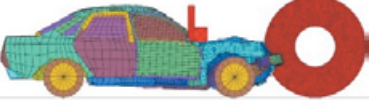
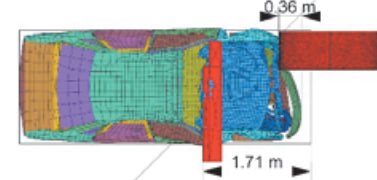
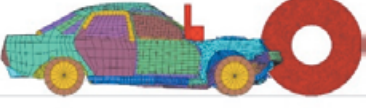
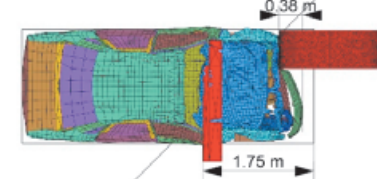
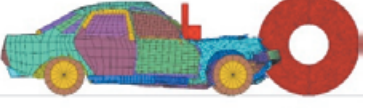
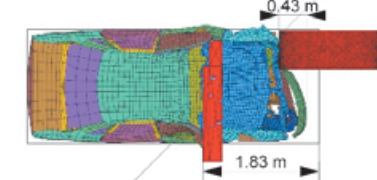
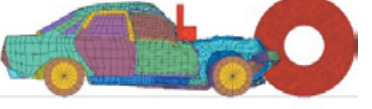
The finite element method (FEM) available in the PC-Crash software was used in the calculations. It is shown that the finite element method can be successfully used in such cases. It was also noticed that the stiffness of the windshield of a passenger car structural model has an excessively strong effect on the deformation of the roof and the value of the EES parameter. A simplification of the model by removing the windshield is proposed.

### **Key Words**

EES, FEM, Finite Elements Method, PC-Crash.

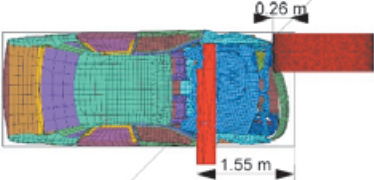
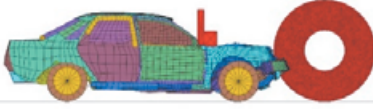
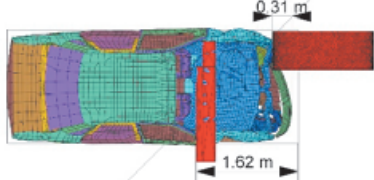
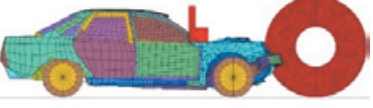
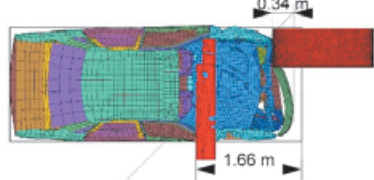
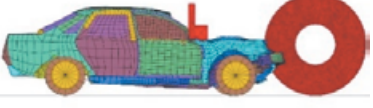
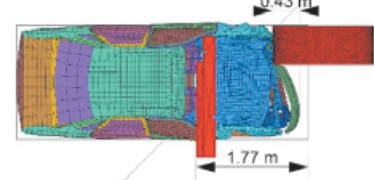
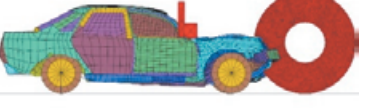
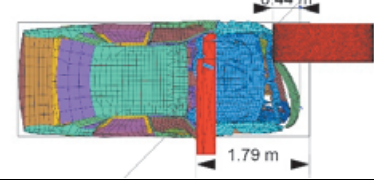
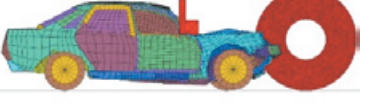
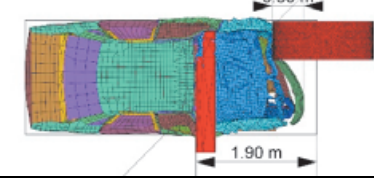
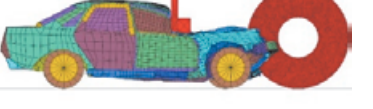
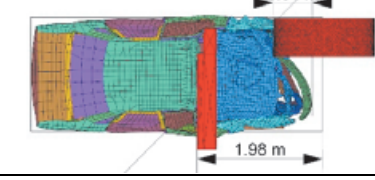
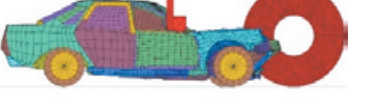
**z problemów rekonstrukcji wypadków i opiniowania**

*Załącznik nr 1*

| <b>EES [km/h]</b> | <b>Deformacje modelu Forda Taurusa z przednią szybą</b>                             |  |
|-------------------|---|--|
| 60                |    |    |
| 65                |    |    |
| 70                |    |    |
| 75                |   |   |
| 80                |  |  |
| 85                |  |  |
| 90                |  |  |



Załącznik nr 2

| EES [km/h] | Deformacje modelu Forda Taurusa bez przedniej szyby                                 |  |
|------------|---|--|
| 60         |    |    |
| 65         |    |    |
| 70         |    |    |
| 75         |   |   |
| 80         |  |  |
| 85         |  |  |
| 90         |  |  |

