

Paweł SKONIECKI<sup>1</sup>  
Włodzimierz ABRAMOWICZ<sup>2</sup>

## **DOŚWIADCZALNE I SYMULACYJNE BADANIA PARAMETRÓW ABSORBERA ENERGII UDERZENIA DLA POJAZDU FORMUŁA STUDENT**

*Prezentowano metodę symulacyjnego badania absorbera energii uderzenia zastosowanego w pojeździe Formuła Student. Oszacowano wartości istotnych parametrów wpływających na proces zgniatania absorbera oraz zweryfikowano otrzymane wyniki poprzez statyczne i dynamiczne badania doświadczalne. Badanie symulacyjne sił i opóźnień przeprowadzono przy użyciu programu komputerowego LS-Dyna.*

## **EXPERIMENTAL AND SIMULATING INVESTIGATIONS OF PARAMETERS OF IMPACT ATTENUATOR TO FORMULA STUDENT VEHICLE**

*In the article we presented the method of research the impact attenuator used in Formula Student car. Parameters which affect crushing were evaluated and then validate them in static and dynamics tests. LS-Dyna software was used to simulate forces and accelerations during crushing.*

### **1. WSTĘP**

Praca pod tytułem „Doświadczalne i symulacyjne badania parametrów absorbera energii uderzenia dla pojazdu formuła student”, porusza zagadnienia dotyczące rozpraszania energii w absorberach osiowych. Opisany proces dotyczy sposobu projektowania struktur rozpraszających energię, możliwych do zastosowania w tzw. „strefach kontrolowanego zgniotu” wszelkiego typu urządzeń zabezpieczających i pojazdów. W szczególności w pracy uwypuklono zagadnienia związane z projektowaniem absorbera spełniającego przepisy określone w regulaminie Formuła Student.

W pracy przedstawiono metodę symulacyjnego badania sił i przyspieszeń absorbera energii uderzenia w trakcie zgniatania oraz weryfikację otrzymanych wyników poprzez badania w warunkach statycznych i dynamicznych.

---

<sup>1</sup> Przemysłowy Instytut Motoryzacji, 03-301 Warszawa ul. Jagiellońska 55,  
E-mail: p.skoniecki@pimot.ogr.pl

<sup>2</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, 02-524 Warszawa ul. Narbutta 84  
Tel: (0 -22) 234 + wew: 8578, E-mail: wa@impactdesign.pl

## 2. ABSORBER ENERGII UDERZENIA

### 2.1 Wymogi [1]

Zaprojektowany absorber jest elementem wymaganym regulaminowo przez organizatorów zawodów Formuła Student. Zostały nałożone ograniczenia zarówno gabarytowe, jak i wartość opóźnienia, które może zadziałać na kierowcę podczas zderzenia. Według regulaminu pojazd o masie 300 kg i prędkości początkowej wynoszącej 7 m/s, ma uderzyć w nieodkształcalną przeszkodę. Opóźnienie nie może przekraczać 40 g dla wartości maksymalnej oraz 20 g dla wartości średniej.

### 2.2 Projekt wstępny [3]

Znając podstawowe wymogi oszacowano średnią siłę zgniatającą element oraz energię, jaka musi zostać rozproszona. Na podstawie otrzymanych wartości przeanalizowano profile dostępne na rynku. W celu uproszczenia poszukiwań przyjęto, że profil musi być wykonany z aluminium oraz przekrój musi być kwadratowy lub okrągły. Korzystając z norm, obliczono dla każdego materiału średnią geometryczną z wartości  $R_e$  (granica plastyczności) i  $R_m$  (granica na zrywanie). Następnie wyliczono pełen moment plastyczny dla profilu o przekroju kwadratowym:

$$M_0 = \frac{\sigma_0 \cdot t^2}{4} \quad (1)$$

gdzie:  $\sigma_0 = \sqrt{R_e \cdot R_m}$   
t- grubość ścianki

Posiadając wyniki dla poszczególnych przekrojów i grubości można było wyznaczyć pełną siłę zgniatającą:

$$P_m = M_0 \cdot 52,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{C}{t}} \quad (2)$$

gdzie:  $M_0$ - pełen moment plastyczny  
C- długość boku profilu  
t- grubość ścianki

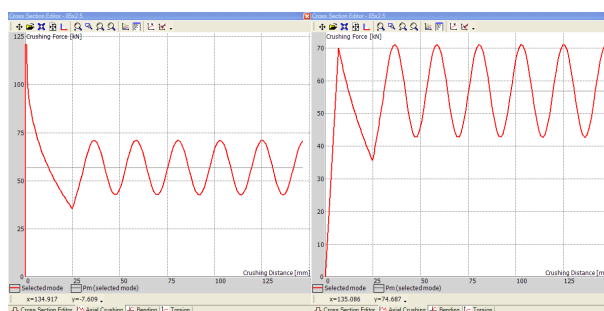
Po przeanalizowaniu otrzymanych wyników okazało się, że tylko kilka profili spełniało te wymogi. Ich rozmiary były na tyle duże, że po zgnieciu rozeszłyby się na boki tak bardzo, że nie mieściłyby się w polu określonym przez organizatorów. Skupiono więc uwagę na profilach okrągłych. Wyznaczono pełen moment plastyczny ze wzoru (1). Pełną siłę plastyczną [4] wyznaczono ze wzoru:

$$P_m = M_0 \cdot \frac{25,23 \cdot \sqrt{\frac{2R}{t}} + 15,09}{0,86 - 0,568 \cdot \sqrt{\frac{t}{2R}}} \quad (3)$$

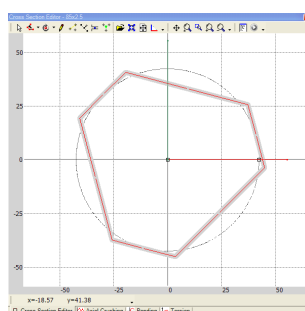
gdzie:  $M_0$ - pełen moment plastyczny  
 $t$ - grubość ścianki  
 $R$ - promień profilu

### 3. VISUAL CRASH STUDIO

Wytypowane profile zostały poddane dogłębnej analizie w programie Visual Crash Studio. Sam profil podczas zgniatania potrzebuje dużej wartości siły, aby zainicjować zgniatanie. Jej wartość można obniżyć poprzez zastosowanie nagniecenia, zwanego wyzwalaczem. Visual Crash Studio jest to program typu MEB. Za jego pomocą określono wysokość, kształt oraz głębokość, na jaką należało nagnieść wyzwalacz.



Rys.1. Przebieg wartości siły w funkcji drogi zgniatania. Po lewej stronie rura bez wyzwalacza, po prawej rura z wyzwalaczem



Rys.2. Przekrój profilu, pokazujący wyzwalacz (trigger)

Ze wszystkich pozytywnie zweryfikowanych rur wytypowano trzy, o średnicach  $\varnothing 80$ , 85 i 90mm i grubości ścianki 2,5mm. Materiał, z jakiego zostały wykonane to stop aluminium, 6060 w stanie utwardzenia T6. [2] Pokazany wyzwalacz na rys.2. ma zainicjować powstanie modu diamentowego. Jest to rodzaj modu asymetrycznego, w którym kolejne fale plastyczne zapadają się naprzemiennie do środka i na zewnątrz.

#### 4. BADANIA

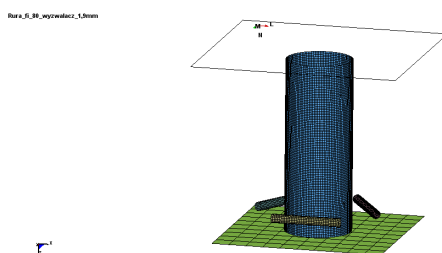
Zakres badań obejmował: modele symulacyjne, utworzone w programie LS-Dyna. Jest to program typu MES służący do obliczeń procesów szybkozmiennych; Próbę statyczną, przeprowadzoną na maszynie do badań wytrzymałościowych w Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej; Test dynamiczny, przeprowadzony w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji PIMot.

##### 4.1 Próbka

Modele symulacyjne badano dla trzech różnych średnic:  $\varnothing 80$ , 85 i 90mm. Głębokości wyzwalacza było 7 dla każdej rury. Podstawowa głębokość, tak zwana nominalna, oszacowana w programie Visual Crash Studio oraz 3 płytsze i 3 głębsze nagniecenia. Wpływ wysokości nagniecenia wyzwalacza badano przy nominalnej głębokości. Podstawowa wysokość, nazwana nominalną, oszacowana w programie Visual Crash Studio, oraz 3 dodatkowe wysokości. Stałym parametrem była grubość ścianki wynosząca 2,5mm, oraz materiał, z jakiego rury były wykonane.

##### 4.2 Model symulacyjny [4]

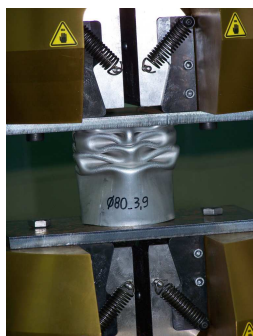
Do symulacji komputerowej posłużyły modele utworzone w programie LS-Dyna – LSTC Prepost-processing. Do samych obliczeń posłużył program LS-Dyna – Solvers. Model przygotowano w następujący sposób: na płytę o właściwościach Rigid postawiono rurę, bez nagniecenego wyzwalacza. Utworzono 3 wałeczki, przypisano im właściwości Rigid oraz nadano ruch. Rura otrzymała właściwości materiałowe \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY, wpisywane wartości pobrano z norm. Wynikało to z braku możliwości sprawdzenia otrzymanego materiału. Na koniec dodano płytę Rigid o masie 300 kg i prędkości początkowej 7 m/s.



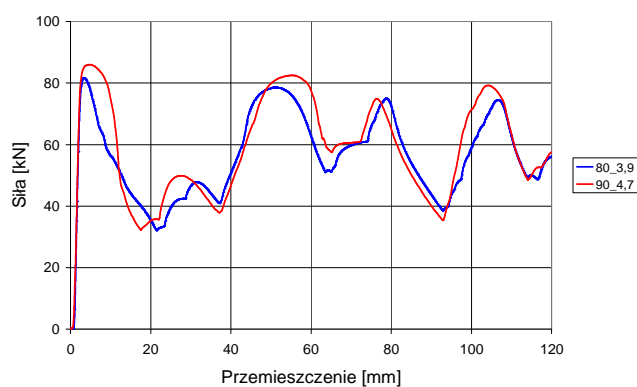
Rys.3. Gotowy model do obliczeń

### 4.3 Test statyczny

Test statyczny absorbera został przeprowadzony na uniwersalnej maszynie do badań wytrzymałościowych Instron 8802 o zdolności obciążeniowej 250kN, rys.4. Prędkość posuwu głowicy wynosiła 20mm/min.



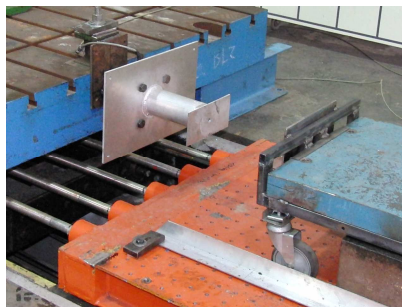
Rys.4. Rura Ø80 po zgnieceniu



Rys.5. Przebieg siły w funkcji przemieszczenia. Wynik testu statycznego dla rur Ø80 i Ø90 z wyzwalaczami nagniecionymi na głębokość nominalną

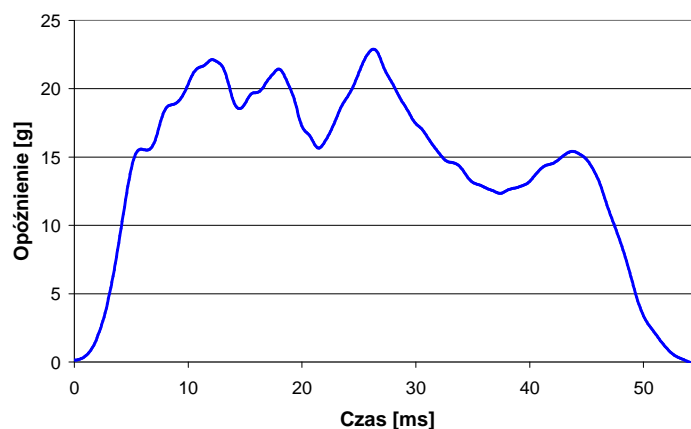
Na rys.5. przedstawiono wykresy siły w funkcji przemieszczenia. Zgniatanie zakończyło się na wartości przemieszczenia równej 120mm z powodu sposobu umieszczenia próbki oraz ograniczeń możliwości maszyny.

#### 4.4 Test Dynamiczny



Rys.6. Widok stanowiska do badań absorbera energii

Widoczny na rys.6. wózek do badania dynamicznego posiadał masę 301 kg i została jemu nadana prędkość początkowa wynosząca 25,4 km/h. Opisane warunki testu spełniają wymogi opisane w regulaminie Formuły Student.

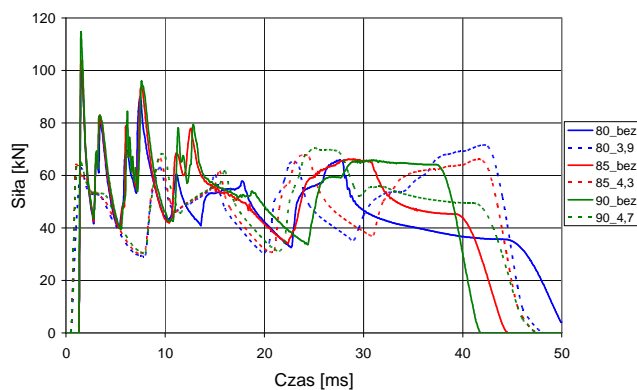


Rys.7. Przebieg opóźnienia w funkcji czasu

Na rys.7. przedstawiono przebieg opóźnienia w funkcji czasu. Z wcześniejszych założeń dotyczących opóźnień wynika, że absorber spełnił wymogi regulaminu. Opóźnienie maksymalne osiągnęło wartość 22,9 g, a średnie wartość 12,3 g.

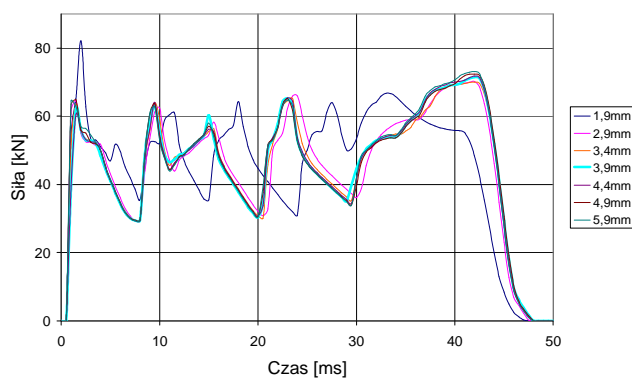
#### 5. WYNIKI [6]

Wykonano łącznie 33 modele symulacyjne, 2 testy statyczne i 1 test dynamiczny. Z przeprowadzonych badań uzyskano dużą ilość wyników. Z każdej symulacji poddano analizie 10 wybranych parametrów. W artykule zostaną przedstawione tylko najistotniejsze z nich.



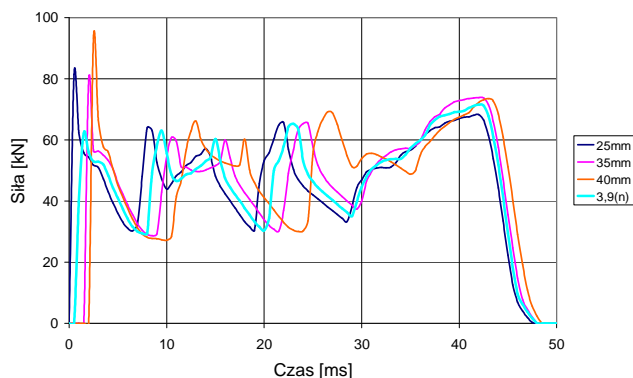
Rys.8. Wykres siły w funkcji czasu. Przypadek rur o różnych średnicach bez wywalacza oraz z wywalaczami nagniecionymi na głębokość nominalną

Na rys.8. widać, że siły działające na rurę bez wywalacza są znacznie większe niż ich odpowiedniki z wywalaczem. Różnica impulsów w początkowej fazie zgniatania sięga 40%. Można również wywnioskować, że z rur o różnych średnicach, najlepszą okazała się rura o najmniejszej średnicy. Siły działające na nią są najmniejsze, czas trwania zgniatania najdłuższy, a co za tym idzie, przyspieszenie najmniejsze.



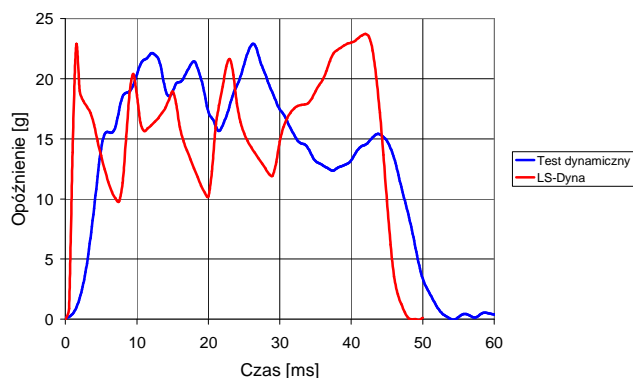
Rys.9. Wykres siły w funkcji czasu. Przypadek rur o tej samej średnicy, z wywalaczami nagniecionymi na różną głębokość

Z rys.9. można odczytać, że siły działające na rurę o najtęplej nagniecionym wywalaczu są największe. Każdy następny przebieg jest zbliżony do siebie. Można stwierdzić, że nagniecenie wywalacza powyżej pewnej krytycznej wartości nie wpływa znacząco na przebieg siły. Biorąc pod uwagę, że wszystkie rury mają stałą grubość, to nagniecenie wywalacza na głębokość większą niż 4% średnicy rury, spowoduje oczekiwany przebieg zgniatania.



Rys.10. Wykres siły w funkcji czasu. Przypadek rur o tej samej średnicy, z wywalczaczami nagniecionymi na różnej wysokości, przy nominalnej głębokości

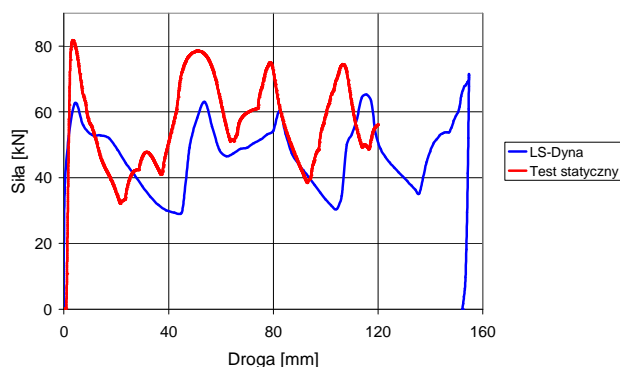
Na rys.10. widać, że siły działające na rurę są mniejsze, gdy wywalczacz nagnieciony jest na wysokości odpowiadającej długości fali plastycznej. Jeśli zostanie nagnieciony choćby o 5mm za wysoko lub za nisko, powoduje to wzrost siły o ponad 25%.



Rys.11. Wykres opóźnienia w funkcji czasu. Porównanie wyników symulacyjnych z doświadczalnymi. Przypadek rur o średnicy  $\varnothing 80$

Rys.11. przedstawia przebiegi dla tej samej rury w różnych badaniach. Wartości średnie wynoszą odpowiednio 14,9 g dla symulacji i 12,3 g dla testu dynamicznego. Podstawową różnicą przebiegów jest impuls siły w pierwszym momencie zgniatania. Dla testu dynamicznego praktycznie go nie ma. Wartość rośnie łagodniej, ilość rozproszony energii w początkowej fazie jest mniejsza, więc i proces zgniatania trwa dłużej. Różnica ta może wynikać z innych właściwości materiałów.





Rys.12. Wykres siły w funkcji przemieszczenia. Porównanie wyników symulacyjnych z doświadczalnymi. Przypadek rur o średnicy  $\varnothing 80$

Rys.12 przedstawia przebieg siły w funkcji przemieszczenia. Widać na nim, że wykresy są dość podobne, co do kształtu, lecz osiągają inne wartości. Niewielkie przesunięcie w fazie, może wynikać z innych długości fal plastycznych lub nagniecenia wyzwalacza na próbce na trochę innej wysokości niż nominalna. Z powodu ograniczeń maszyny do badań wytrzymałościowych próbka nie została zgnieciona do końca. Nie rozproszyła wystarczającej ilości energii. Można spekulować, że z wyniku większych wartości sił, wystarczająca ilość energii zostanie rozproszona na krótszym odcinku.

## 6. WNIOSKI

W artykule przedstawiono metodę badań sił i przyspieszeń działających podczas zgniatania absorbera energii uderzenia dla pojazdu Formuła Student. Przedstawiona tu metoda umożliwiła zbadanie wpływu parametrów wyzwalacza na przebieg zgniatania absorbera osiowego wykonanego z profilu okrągłego. Należy jednak zaznaczyć, że element ten nigdy nie będzie użyty, podczas zawodów nie dojdzie do wypadku, gdyż zespoły biorące udział w zawodach startują osobno. Absorber ten został zaprojektowany tak, aby pozytywnie przejść próbę opisaną w regulaminie.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] 2009 Formula SAE Rules [online]. SAE International, 2008. [dostęp: 2009-05-15]. <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2009fsaerules.pdf>.
- [2] dr Włodzimierz Abramowicz – materiały dydaktyczne „Zasady projektowania absorberów osiowych”.
- [3] dr Włodzimierz Abramowicz – materiały dydaktyczne „Dynamic progressive buckling of circular and square tubes” Departament od Mechanical Engineering, The University of Liverpool 1986.

- [4] dr Włodzimierz Abramowicz – materiały dydaktyczne “Dynamic axial crushing of circular tubes” Departament od Mechanical Engineering, The University of Liverpool 1984.
- [5] MESco [online] LSTC LS-DYNA [dostęp: 2009-05-20]  
[http://www.mesco.com.pl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=85&Itemid=58](http://www.mesco.com.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=85&Itemid=58).
- [6] Skoniecki Paweł – praca magisterska - Doświadczalne i symulacyjne badania parametrów amortyzatora uderzeń pojazdu Formuła Student – Politechnika Warszawska, wydział SiMR, 2009.