

BEHAVIOUR OF BUSES STRUCTURE IN RELATION TO REQUIREMENTS OF NO. 66 UN-ECE REGULATION

Zbigniew Barszcz

Tadeusz Diupero

Automotive Industry Institute
ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 8114841, fax: +48 22 8116028
e-mail: z.barszcz@pimot.org.pl
tel.: +48 22 8111397
e-mail: blb@pimot.org.pl

Abstract

In the paper are presented same general conclusions concerning the structure strength of buses subjected to the tests according to UN-ECE Regulation No. 66, particularly in relation to method based on a roll-over test on a body section of vehicle. This conclusions are based on our test experiences in PIMOT.

In compliance with the Regulations the vehicle can be checked with four methods described in the contribution. On purpose research is the qualification of the safety in the area of the protected space, qualified also as the space of the survival for passengers, compactly dependent from the degree of the deformation of the body investigated vehicle. Most objective is the method of the complete to turn over. From economic consideration preferred is the leaning method on the upset of the chosen segment of the body. Besides one adverted on the computer simulation based for the finite elements method.

Keywords: buses, rollover, passive safety, No. 66 UN-ECE Regulation, testing methods

ZACHOWANIE SIĘ KONSTRUKCJI AUTOBUSÓW POD KĄTEM WYMAGAŃ ZAWARTYCH W REGULAMINIE NR 66 EKG ONZ

Streszczenie

W artykule przedstawiono pewne ogólne wnioski dotyczące wytrzymałości konstrukcji autobusów przedstawionych do badań zgodnie z Regulaminem nr 66 EKG-ONZ, a w szczególności w odniesieniu się do metody opartej na przewracaniu segmentu nadwozia pojazdu. Wnioski te oparte są o własne doświadczenia badawcze w PIMOT. Zgodnie z Regulaminem homologacji podlegają jednopokładowe pojazdy przeznaczone do przewozu więcej niż 16 pasażerów oraz załogi.

Zgodnie z Regulaminem pojazd można sprawdzać czterema metodami opisanymi w artykule. Celem badań jest określenie bezpieczeństwa w obszarze przestrzeni chronionej, określanej również jako przestrzeń przeżycia dla pasażerów, ściśle zależnego od stopnia deformacji nadwozia badanego pojazdu. Najbardziej obiektywną jest metoda przewrócenia kompletnego. Ze względów ekonomicznych preferowana jest metoda oparta na przewracaniu wybranego segmentu nadwozia. Ponadto zwrócono uwagę na symulację komputerową opartą o metodę elementów skończonych.

Słowa kluczowe: autobusy, przewracanie, bezpieczeństwo bierne, Regulamin nr 66 EKG ONZ, metody badań

1. Wprowadzenie

Wraz z przyjęciem do stosowania w Polsce Regulaminu nr 66 EKG ONZ [1], dotyczącego bezpieczeństwa dużych pojazdów do przewozu osób (autobusów), w zakresie wytrzymałości

konstrukcji, pojawiła się potrzeba przeprowadzania odpowiednich badań, przewidzianych w Regulaminie, w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji. Istotnym czynnikiem oceny autobusu podczas próby przewracania na bok, z określonej wysokości i przy określonych warunkach wynikających bezpośrednio z Regulaminu nr 66 EKG ONZ, jest określenie bezpieczeństwa biernego konstrukcji, sprowadzonego do bezpieczeństwa w tzw. „przestrzeni chronionej”, związanego bezpośrednio z możliwością rozpraszania energii kinetycznej przez elementy konstrukcji nośnej nadwozia (zamiana energii kinetycznej zderzenia na pracę odkształcenia konstrukcji).

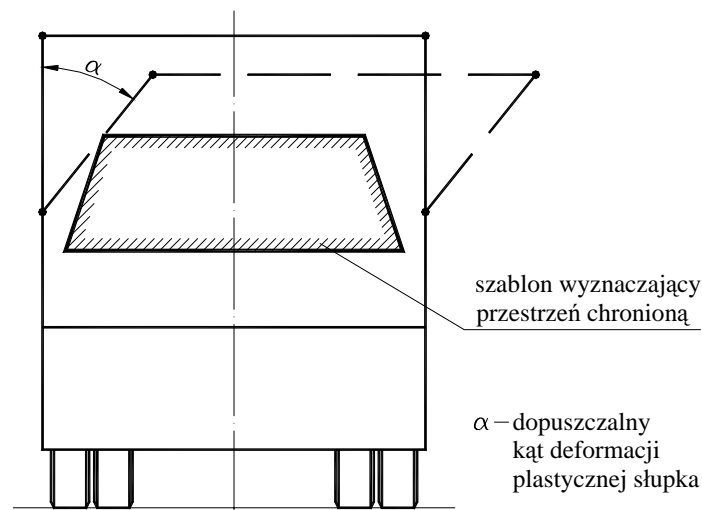
Naszym celem jest przedstawienie, w oparciu o własne doświadczenia wynikające z badań na zgodność z Regulaminem nr 66 EKG ONZ, pewnych ogólnych wniosków dotyczących konstrukcji przedstawianych do badań jak i otrzymanych wyników z odniesieniem się do przewidzianych w Regulaminie metod badawczych.

2. Podstawowe wymagania i metody badań wynikające z Regulaminu nr 66 EKG ONZ

Zgodnie z Regulaminem nr 66 EKG ONZ [1] homologacji podlegają jednopokładowe pojazdy przeznaczone do przewozu więcej niż 16 pasażerów (siedzących lub stojących) nie licząc kierowcy i załogi.

Podstawowe wymagania odnoszą się bezpośrednio do wytrzymałości konstrukcji nośnej pojazdu. Wynika z nich, że podczas badania jedną z możliwych metod badawczych lub po obliczeniach opisanych w Regulaminie:

- żadna przemieszczana część pojazdu nie może się znaleźć w przestrzeni chronionej przedstawionej na Rys. 1.,
- żadna część przestrzeni chronionej nie może się wysunąć na zewnątrz odkształconej konstrukcji.



Rys. 1. Przyjęty model deformacji konstrukcji nośnej autobusu względem szablonu wyznaczającego przestrzeń chronioną

Fig. 1. Assumed deformation model of a bus load bearing structure in relation to the template determining residual space

Zgodnie z Regulaminem pojazd sprawdza się jedną z czterech metod a mianowicie poprzez:

- przewrócenie kompletnego pojazdu metodą opisaną w załączniku 3 do Regulaminu,

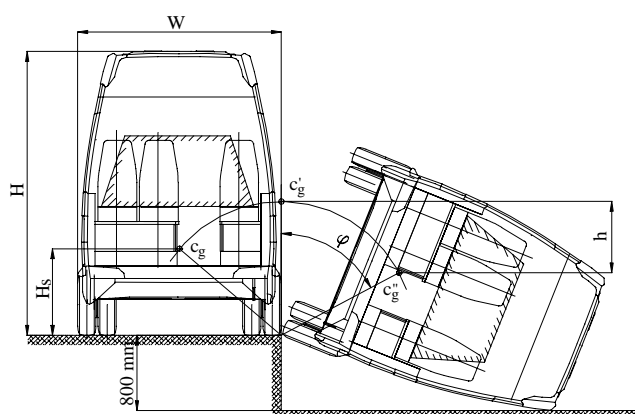
- przewrócenie segmentu nadwozia lub części reprezentujących kompletny pojazd metodą opisaną w załączniku 4 do Regulaminu,
- badanie za pomocą wahadła segmentu lub segmentów nadwozia metodą opisaną w załączniku 5 do Regulaminu,
- sprawdzenie wytrzymałości konstrukcji nośnej za pomocą obliczeń zgodnie z załącznikiem 6 do Regulaminu.

Na Rys. 2. przedstawiono schematycznie sposób przeprowadzenia próby przewracania całego pojazdu jak również segmentu (nie dotyczy badania za pomocą wahadła). Stojący na ruchomej platformie autobus (segment) jest przechylany z małą prędkością (nie przekraczając $0,087 \text{ rad/s}$) do momentu utraty stateczności poprzecznej, następnie autobus ten wykonuje częściowy obrót wokół osi równoległej do osi pojazdu a w końcowej fazie uderza bokiem (krawędzią dachu) o podłoże.

Celem wymienionych powyżej metod badań jest określenie bezpieczeństwa w obszarze przestrzeni chronionej, określanej również jako przestrzeń przeżycia dla pasażerów, ściśle zależnego od stopnia deformacji nadwozia badanego pojazdu.

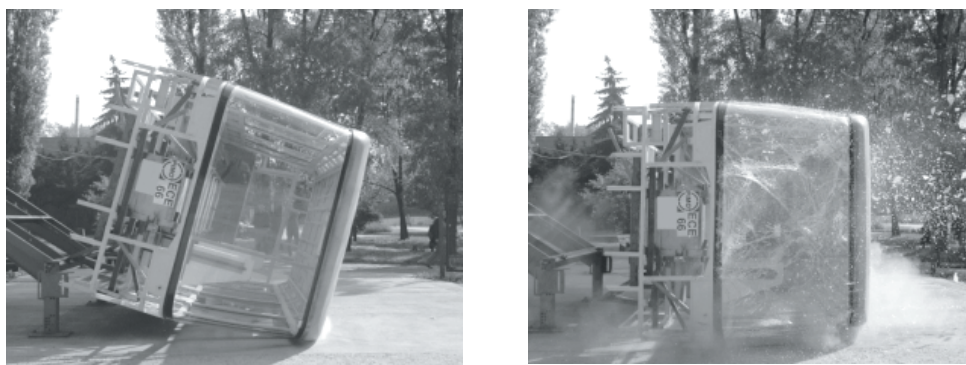
Z pośród wymienionych metod najbardziej obiektywną jest metoda przewrócenia kompletnego (rzeczywistego) pojazdu (Rys. 3.). Jednak ze względu na wysokie koszty, związane bezpośrednio ze zniszczeniem badanego autobusu, stosowana jest niezwykle rzadko, głównie w wypadku małych autobusów.

Do najczęściej stosowanych należy metoda badania oparta na przewróceniu wskazanego segmentu (segmentów) nadwozia.



Rys. 2. Schemat ruchu pojazdu podczas próby przewracania kompletnego nadwozia autobusu lub reprezentującego go segmentu

Fig. 2. Scheme of the rollover test of a complete bus body or a representative body section



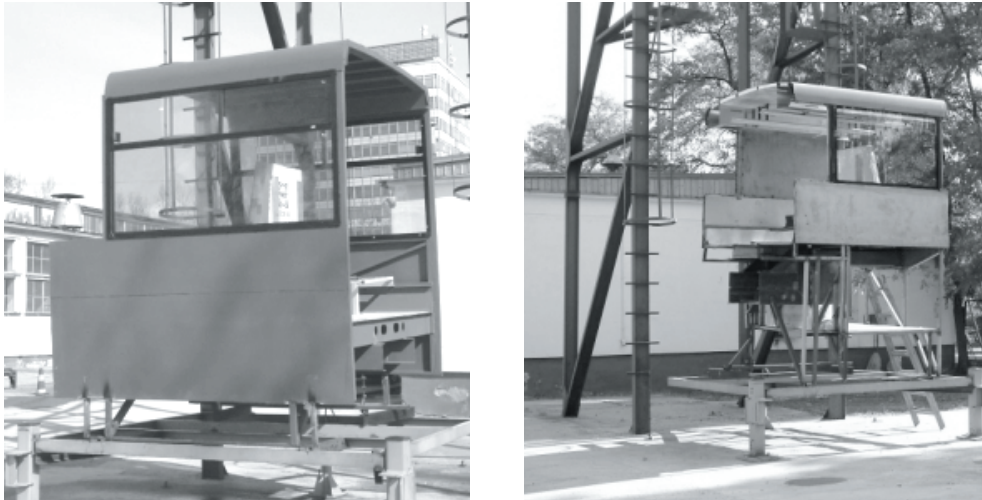
Rys. 3. Przykładowa próba przewrócenia rzeczywistego autobusu

Fig. 3. Example of the rollover test of the existing bus

Podane w dalszej części uwagi, wyniki badań jak również pewne ograniczenia wynikają z własnych doświadczeń związanych ze stosowaniem głównie tej metody przy ocenie badanych konstrukcji autobusów.

3. Badanie metodą segmentu nadwozia

Zgodnie z Regulaminem [1] „segment nadwozia” reprezentuje część pojazdu nieobciążonego i oznacza segment zawierający, co najmniej dwa jednakowe słupki z każdej strony stanowiące część lub części konstrukcji pojazdu (Rys. 4.).



Rys. 4. Przykład segmentów użytych do badań
Fig. 4. Example of the body sections used in tests

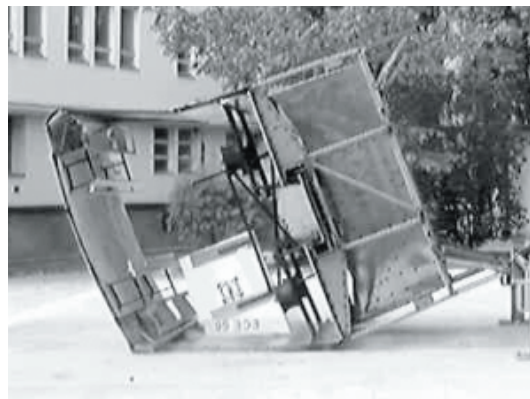
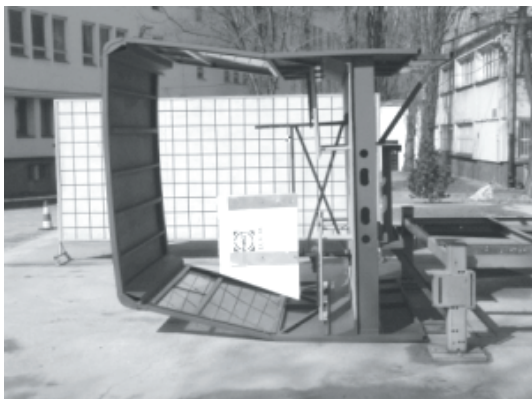
Należy przez to rozumieć, że pojedynczy segment oznacza część pojazdu znajdującą się pomiędzy słupkami wraz z podłogą, ramą, ścianami bocznymi i dachem. Wybrany segment (segmenty) reprezentuje pod względem konstrukcji cały pojazd. Takie cechy jak geometria segmentu, oś obrotu w czasie próby i położenie środka masy w kierunku pionowym i poprzecznym powinny być reprezentatywne dla kompletnego pojazdu.

Podczas próby przewracania segmentu obowiązują identyczne wymagania jak dla całego pojazdu, dotyczące bezpieczeństwa w tzw. przestrzeni chronionej. Pozytywny wynik uzyskany podczas przewracania segmentu nadwozia (Rys. 5. i 6.) jest niewystarczający do pełnej oceny przedstawionego do badań autobusu. Zgodnie z wymaganiami punktu 8.1 Regulaminu nr 66 EKG ONZ, jeżeli badaniu poddawane są segmenty nadwozia, to należy upewnić się, że pojazd spełnia warunki określone w dodatku 2, załącznika 5 do tego Regulaminu, w zakresie wymagań, co do rozmieszczenia części konstrukcji nośnej pojazdu pochłaniających główną część energii.

Punktem wyjścia do sprawdzenia tych warunków jest określenie całkowitej energii E^* możliwej do pochłonięcia przez kompletną konstrukcję pojazdu. Energia ta jest obliczana zgodnie z dodatkiem 1, załącznika 5 do Regulaminu, w oparciu o podstawowe dane pojazdu a mianowicie: masę nieobciążonego pojazdu (z dodatkową masą 75kg zastępującą kierowcę), W - całkowitą szerokość pojazdu, H - wysokość pojazdu i H_s - wysokość środka masy nieobciążonego pojazdu (Rys. 2.). W wypadku, gdy kształt przekroju poprzecznego znacznie odbiega od kształtu prostokątnego wartość całkowitej energii E^* należy obliczać ze wzoru opartego na przemieszczeniu środka masy – h , wyznaczonym metodą graficzną (Rys. 2.).

Z naszych doświadczeń wynika, że energia E^* obliczana w ten sposób jest czasami wyższa około 20% od energii bazującej tylko na wymiarach poprzecznych.

W następnym kroku, na podstawie dostarczonej dokumentacji konstrukcyjnej oraz informacji od producenta, określana jest liczba słupków (powyżej dolnej krawędzi okien) decydujących o wytrzymałości konstrukcji nośnej autobusu. Istotna jest zarówno liczba słupków jak również liczba i dokładne ich położenie (w kierunku wzdłużnym) przed i za środkiem masy analizowanej konstrukcji pojazdu. Ilość energii E_i , która może być pochłonięta przez i-ty słupek określana jest na podstawie dodatkowego eksperymentu na stanowisku badawczym oraz obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem MES.



Rys. 5. Deformacje segmentów pokazanych na Rys. 4. uzyskane po ich przewróceniu
Fig. 5. Deformation of the body sections showed in the Fig. 4 after the rollover test



Rys. 6. Deformacja przedniej części autobusu po jej przewróceniu (segment potrójny)
Fig. 6. Deformation of the front bus section after the rollover test (triple body section)

Otrzymane w wyniku opisanego toku postępowania dane w końcowej fazie służą do sprawdzenia wymagań, co do rozmieszczenia części konstrukcji nośnej pojazdu pochłaniających główną część energii chyba, że wynik uzyskany podczas przewracania segmentu był negatywny (Rys. 7.). Należy tu nadmienić, że spełnienie tylko samych wymagań, bez przewrócenia segmentu, jest niewystarczające do pełnej oceny wytrzymałościowej analizowanej konstrukcji.



Rys. 7. Negatywny wynik uzyskany podczas przewracania segmentu nadwozia autobusu

Fig. 7. Negative result of the rollover test of the bus body section

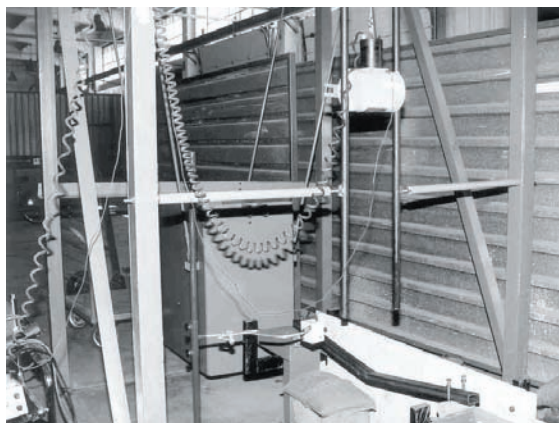
4. Określenie energii pochłanianej przez pojedynczy słupek konstrukcji nośnej pojazdu

Na Rys. 1. pokazano przyjmowany do obliczeń model deformacji konstrukcji nośnej autobusu względem szablonu wyznaczającego przestrzeń chronioną. Założono płaski, uproszczony model deformacji w poszczególnych przekrojach, przechodzących przez słupki konstrukcji nośnej autobusu. W modelu tym założono możliwość powstawania przegubów plastycznych, w słupkach okiennych na dole i na górze, w okolicy ich łączenia z pozostałymi elementami konstrukcyjnymi (po dwa w każdym słupku).

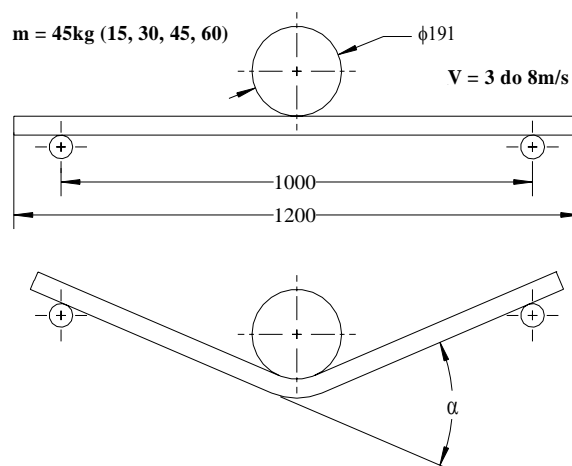
W celu określenia ilości energii możliwej do pochłonięcia przez pojedynczy przegub plastyczny i-tego słupka, dla wytypowanych profili zamkniętych - elementów belkowych o określonych przekrojach poprzecznych, (z których wykonane są słupki międzyokienne w przeważającej liczbie dużych autobusów), przeprowadzane są:

- testy doświadczalne (na stanowisku badawczym) dynamicznego gięcia belek, podpartych na dwu podporach, przez spadającą z określonej wysokości masę, w celu określenia tzw. kąta deformacji plastycznej [2], [3];
- obliczenia symulacyjne (z wykorzystaniem MES), odwzorowujące test dynamiczny elementów belkowych użytych w teście, w celu dobrania właściwego modelu materiału, przy jednoczesnym zapewnieniu zgodności wyników z symulacji, z wynikami uzyskanymi na stanowisku badawczym (weryfikacja zgodności symulacji komputerowej z eksperymentem);
- obliczenia symulacyjne, w oparciu o dobrany model obliczeniowy, w celu określenia, dla zadanego dopuszczalnego kąta deformacji plastycznej (bez penetracji w obszar przestrzeni chronionej - Rys. 1.), energii pochłanianej przez pojedynczy przegub plastyczny i-tego słupka.

Testy doświadczalne dynamicznego gięcia cienkościennych profili zamkniętych (elementów belkowych) przeprowadzane są na stanowisku badawczym pokazanym na Rys. 8. Schematyczne dane dotyczące stanowiska przedstawione są na Rys. 9. W zależności od przekroju stalowego profilu analizowanej konstrukcji są do dyspozycji cztery masy (15, 30, 45 i 60 kg) w kształcie walca. Powstające w czasie dynamicznego zginania duże deformacje związane są z powstawaniem przegubu plastycznego, w rejonie zetknięcia się spadającej masy z elementem belkowym. Pokazany na Rys. 9., otrzymany z eksperymentu, kąt deformacji plastycznej służy bezpośrednio do porównywania wyników eksperymentu dynamicznego z wynikami symulacji komputerowej.



Rys. 8. Stanowisko do dynamicznego zginania elementów belkowych
Fig. 8. Test stand for impact bending of beam elements



Rys. 9. Schemat stanowiska
Fig. 9. Scheme of a test stand

Do obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem MES przyjęto następującą zależność, naprężenia - σ w funkcji odkształcenia - ε (wydłużenia jednostkowego) [2], opisującą w zakresie plastycznym model materiału, z którego wykonane są słupki konstrukcji nośnej autobusu:

$$\sigma = R_e \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m, \quad (1)$$

gdzie:

$$\varepsilon_0 = \frac{R_e}{E},$$

R_e – granica plastyczności (przyjmowana na podstawie atestów materiałowych),

E – moduł sprężystości podłużnej.

Wykładnik - m (występujący we wzorze opisującym model materiału) jest każdorazowo dobierany w wyniku kolejnych symulacji komputerowych, bezpośrednio na podstawie porównywania wyników uzyskiwanych na stanowisku doświadczalnym z wynikami uzyskiwanymi z obliczeń.

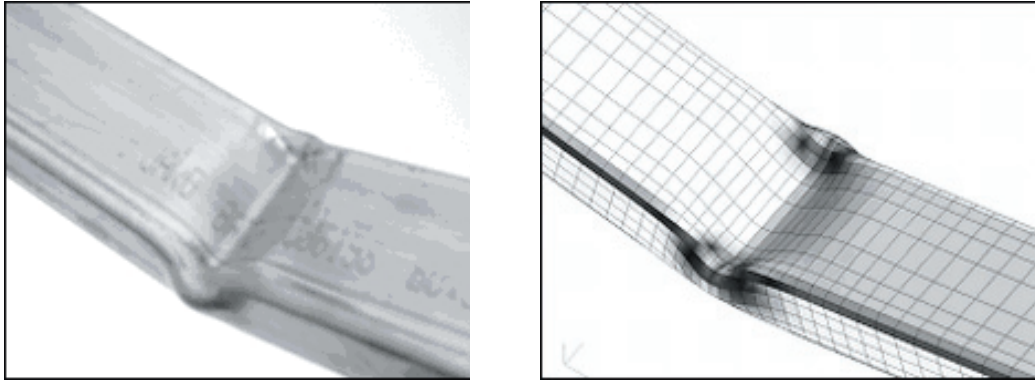
Rys. 10. przedstawia porównanie kształtu wybranego, przykładowego elementu belkowego (w okolicy miejsca powstawania przegubu plastycznego) uzyskanego z eksperymentu dynamicznego gięcia (strona lewa), z kształtem tego samego elementu uzyskanym w wyniku symulacji komputerowej po identyfikacji modelu materiału.

Kolejne obliczenia oparte o zidentyfikowane modele materiału pozwalają każdorazowo na jednoznaczne określenie energii pochłanianej przez analizowane profile szkieletu nadwozia w zależności od zadanego, uzyskanego z analizowanej konstrukcji lub eksperymentu, kąta deformacji plastycznej (Rys. 11., h – wysokość z jakiej zrzucana jest masa użyta do wymuszenia deformacji).

Użyte oprogramowanie:

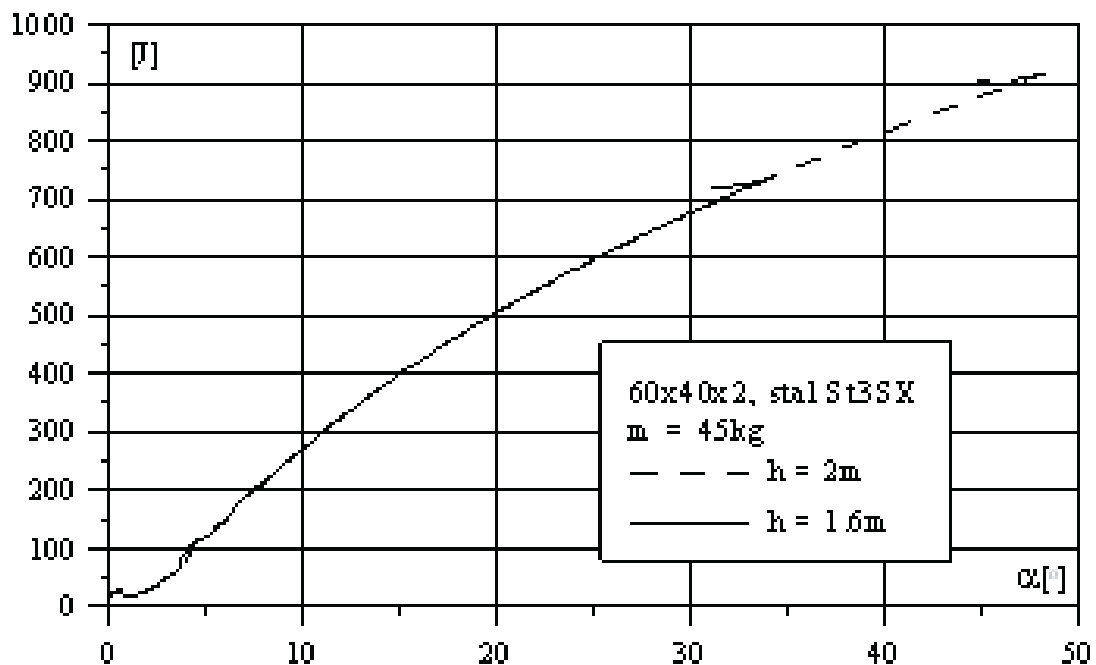
MSC.Patran – program graficzny do przygotowywania modeli MES i prezentacji wyników obliczeń,

MSC.Dytran – solver do realizacji obliczeń symulacyjnych (przeznaczony do rozwiązywania szybkozmiennych procesów dynamicznych, silnie nieliniowych z uwzględnieniem dużych deformacji plastycznych).



Rys. 10. Porównanie wyników doświadczalnych z wynikami symulacji komputerowej dla elementu belkowego o wymiarach poprzecznych 60x30x2 (stal 1.4003)

Fig. 10. Comparison of the test and computer simulation results for a beam element with lateral dimensions 60x30x2 (steel 1.4003)



Rys. 11. Energia wewnętrzna w funkcji kąta deformacji plastycznej dla profilu 60x40x2

Fig. 11. Internal energy as a function of plastic deformation angle for the section 60x40x2

5. Badanie metodą segmentu nadwozia pojazdów przystosowanych do przewozu osób na bazie samochodów typu furgon

W wypadku dużych autobusów elementami konstrukcji nośnej nadwozia są najczęściej stalowe cienkościenne profile zamknięte o przekroju prostokątnym i kwadratowym. Z elementów tych zbudowane są przede wszystkim szkielety ścian bocznych i dachu nadwozia. Jednak coraz częściej, w wypadku mniejszych pojazdów kategorii M_2 , przedstawiona do badań konstrukcja nie jest typową konstrukcją szkieletowo-kratownicową. Konstrukcje takie powstają z przystosowania pojazdów kategorii N_2 (tzw. furgonów) na pojazdy do przewozu osób i są zbudowane podobnie jak samochody osobowe, w przeważającej części, z tłoczonych i spawanych blach. Zapotrzebowanie na tego typu

konstrukcje i liczba firm zajmujących się ich adaptacją świadczy, że budowa tego typu pojazdów jest ekonomicznie uzasadniona.

Przystosowanie typowego furgonu do przewozu osób polega głównie na zamontowaniu foteli, okien (najczęściej w miejsca do tego przewidziane) oraz dość często do modyfikacji drzwi. Czasami modyfikacje konstrukcyjne są dużo większe i polegają na wstawieniu nowych, większych ram okiennych a nawet na wydłużeniu ramy pojazdu bazowego.

Z naszych doświadczeń, z tego typu pojazdami przedstawianymi do badań na zgodność z Regulaminem nr 66 EKG ONZ wynika, że należy dla nich wykluczyć badanie poprzez przewrócenie segmentu nadwozia. Wytrzymałość tego typu konstrukcji zależy przede wszystkim od wytrzymałości konstrukcji nośnej przedniej i tylnej części nadwozia autobusu (Rys. 12. i 13.).



Rys. 12. Deformacja przedniej i tylnej części nadwozia adaptowanego na bazie furgonu Mercedes Sprinter po przewróceniu zgodnie wymaganiami Regulaminu (wynik pozytywny)

Fig. 12. Deformation of the front and rear sections of a bus body adapted on the basis of Mercedes Sprinter van after rollover test according to requirements of Regulation (the positive result)



Rys. 13. Negatywny wynik uzyskany podczas przewracania segmentu nadwozia pokazanego na Rys. 12

Fig. 13. Negative result of the rollover test of the body section showed in the Fig. 12

6. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych dotychczas badań na zgodność z Regulaminem nr 66 EKG ONZ możemy stwierdzić, że ze strony producentów pojazdów, ze względów ekonomicznych, preferowana jest metoda oparta na przewracaniu wybranego segmentu (segmentów) nadwozia. Z zachowania się badanych konstrukcji autobusów wynika, że z powodzeniem można stosować tę metodę w odniesieniu do autobusów, gdzie elementami

konstrukcji nośnej są stalowe cienkościennie profile zamknięte o przekroju prostokątnym i kwadratowym, z których zbudowany jest szkielet ścian bocznych i dachu nadwozia. W metodzie tej przy sprawdzeniu warunków, co do rozmieszczenia części konstrukcji nośnej pojazdu (słupków) pochłaniających główną część energii, podstawą jest, oparta na eksperymencie, właściwa identyfikacja parametrów przyjmowanego modelu materiału, z którego są wykonane stalowe profile analizowanej konstrukcji.

W wypadku homologacji pojazdów przystosowanych do przewozu osób i zbudowanych na bazie istniejących furgonów, najbardziej wiarygodną metodą jest metoda przewracania całego pojazdu.

Regulamin nr 66 EKG ONZ, jako jedną z metod badań dopuszcza również możliwość oceny konstrukcji na podstawie obliczeń np. metodą elementów skończonych – MES (FEM). Metoda ta bazuje na trójwymiarowym modelu geometrycznym konstrukcji pojazdu. Brak takiego modelu generuje dodatkowo dość duże koszty związane z jego budową. Podczas numerycznej symulacji komputerowej, której celem jest odzwierciedlenie rzeczywistego eksperymentu dotyczącego przewrócenia kompletnego pojazdu na jeden bok, obliczenia powinny uwzględniać, zgodnie z rzeczywistością, zachowanie się konstrukcji w wypadku wystąpienia dużych odkształceń plastycznych.

Z doświadczeń Przemysłowego Instytutu Motoryzacji, jak również innych ośrodków zajmujących się badaniami tego typu wynika, że niezależnie od specjalistycznego oprogramowania stosowanego do obliczeń, w celu uzyskania zgodności wyników symulacji z eksperymentem, wymagane są badania na stanowisku badawczym. Badania te analogicznie jak opisane powyżej przy badaniu segmentu, powinny dotyczyć przede wszystkim identyfikacji parametrów modeli materiałów przyjmowanych do obliczeń, jak również (dla nowych typów pojazdów) części lub całego segmentu konstrukcji nośnej w celu sprawdzenia założeń przyjętych do obliczeń. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych (obliczeń) mogą służyć do oceny badanej konstrukcji pod kątem spełnienia wymagań określonych w Regulaminie nr 66 EKG ONZ pod warunkiem, że model matematyczny zastosowany do obliczeń będzie zweryfikowany przez badania na stanowisku badawczym.

Literatura

- [1] Regulamin nr 66 EKG ONZ, *Jednolite przepisy dotyczące homologacji dużych pojazdów do przewozu osób w zakresie wytrzymałości konstrukcji*.
- [2] Barszcz, Z., Krzemień-Ojak, P., *Określenie energii pochłanianej przez profile zamknięte szkieletu nadwozia autobusu w zakresie dużych odkształceń plastycznych*, Czasopismo Techniczne Mechanika, z. 7-M/2004, pp. 67-74, Kraków 2004.
- [3] Pavlata, P., Lacina, L., *A methodology of the bus structure rollover simulation using FEM*, Materiały konferencyjne, EUROPAM 2001, Heidelberg 2001.
- [4] Sprawozdania z badań, *Sprawozdania z badań na zgodność z Regulaminem nr 66 EKG ONZ*, Przemysłowy Instytut Motoryzacji, Warszawa 2003 – 2005.