



Weryfikacja numerycznej symulacji przewracania autobusu według regulaminu 66 EKG ONZ

WACŁAW BORKOWSKI, ZDZISŁAW HRYCIÓW,
ANDRZEJ MUSZYŃSKI*, LECH SOKALSKI*

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

*Przemysłowy Instytut Motoryzacji,
03-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 55

Streszczenie. W pracy przedstawiono problematykę utraty stateczności poprzecznej autobusów. Omówiono wymagania zawarte w Regulaminie 66 EKG ONZ oraz metody przeprowadzania prób wytrzymałości konstrukcji. Przedstawiono także wyniki weryfikacji numerycznej symulacji przewracania autobusu.

Słowa kluczowe: analiza numeryczna, bezpieczeństwo bierne, regulamin 66 EKG ONZ, autobus — wytrzymałość konstrukcji

Symbole UKD: 629.114.5

1. Wprowadzenie

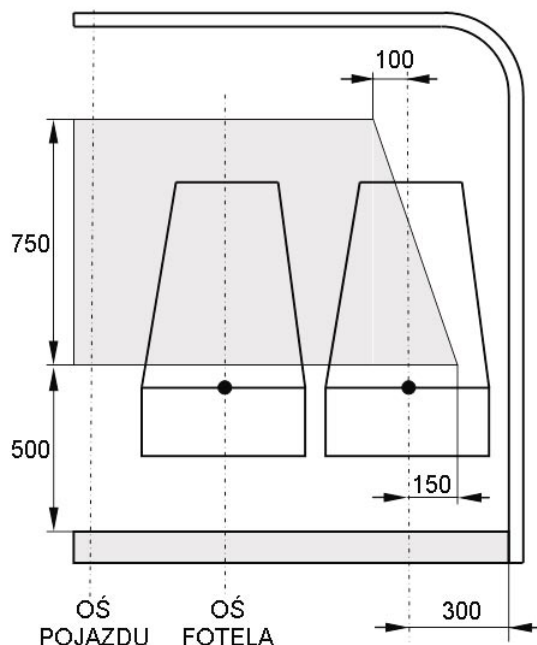
W procesie projektowania nowych pojazdów jednym z priorytetów jest zapewnienie bezpieczeństwa biernego konstrukcji. W szczególności nabiera to znaczenia w odniesieniu do pojazdów transportu zbiorowego. Ze względu na liczbę przewożonych osób, każdy wypadek może skutkować dużą liczbą ofiar. Statystyki wypadków z udziałem autobusów dowodzą, że jednym z najniebezpieczniejszych jest przypadek wywrócenia autobusu. W takiej sytuacji dochodzi do dużych deformacji dachu oraz ściany bocznej, prowadzących zwykle do poważnych zranień, a nawet śmierci pasażerów. Dlatego też ustrój nośny musi zamortyzować uderzenie spowodowane wywróceniem się autobusu w taki sposób, aby energia kinetyczna w czasie zderzenia z podłożem była zamieniona na pracę odkształcenia konstrukcji.

Z drugiej strony odkształcenie konstrukcji nie może być zbyt duże. Doprowadziłoby to do naruszenia minimalnej przestrzeni przeżycia dla kierowcy oraz przewożonych pasażerów. Kształt i wymiary przestrzeni chronionej są określone w Regulaminie 66 [1] oraz przedstawione na rysunku 1.

Na podstawie przepisów obowiązujących od 15 stycznia 2004 roku wszystkie pojazdy, przeznaczone do przewozu więcej niż 16 pasażerów, muszą zostać poddane badaniom oraz spełnić wymagania dotyczące wytrzymałości konstrukcji nośnej zgodnie z Regulaminem 66 EKG ONZ „Jednolite przepisy dotyczące homologacji dużych pojazdów do przewozu osób w zakresie wytrzymałości konstrukcji” [1]. Przepisy regulaminu dotyczą obecnie projektowanych pojazdów oraz tych, które są homologowane po podanej powyżej dacie.

Regulamin 66 określa, że konstrukcja nośna autobusu powinna być na tyle wytrzymała, aby podczas badania jedną z podanych w nim metod badawczych lub po obliczeniach przeprowadzonych zgodnie z zawartym w nim opisie:

- żadna przemieszczana część pojazdu nie znalazła się w przestrzeni chronionej, przedstawionej na rysunku 1,
- żadna część przestrzeni chronionej nie wysunęła się na zewnątrz odkształconej konstrukcji.



Rys. 1. Przestrzeń chroniona

W przypadku autobusów można przeprowadzić jedną z czterech prób wytrzymałościowych według uznania producenta lub wytycznych organu homologującego:

- przewrócenie kompletnego pojazdu zgodnie z procedurą podaną w załączniku 3 do Regulaminu 66 EKG,
- przewrócenie segmentu nadwozia lub części reprezentujących kompletny pojazd zgodnie z załącznikiem 4 do Regulaminu 66 EKG,
- badanie za pomocą wahadła segmentu lub segmentów nadwozia zgodnie z załącznikiem 5 do Regulaminu 66 EKG,
- sprawdzenie wytrzymałości konstrukcji nośnej za pomocą obliczeń zgodnie z załącznikiem 6 do Regulaminu 66 EKG.

Najbardziej wiarygodne wyniki otrzymuje się w wyniku przeprowadzenia próby na kompletnym pojeździe. Niestety, jest to jednocześnie najkosztowniejsza próba prowadząca do zniszczenia autobusu. Z kolei badanie segmentów pojazdu może być obciążone dużym oraz trudnym do oszacowania błędem.

Z tych względów do określania wytrzymałości konstrukcji często wykorzystuje się metody numeryczne, a szczególnie przydatna jest metoda elementów skończonych [2, 3]. Odpowiednio zweryfikowane modele numeryczne konstrukcji oraz sposoby przeprowadzania próby (identyczne jak w przypadku eksperymentu) mogą dostarczać dokładnych wyników deformacji konstrukcji podczas dynamicznego odkształcania. Zastosowanie tego typu metod powoduje znaczne obniżenie kosztów badań, a szczególnie przydatne są na etapie projektowania oraz poszukiwania korzystnych rozwiązań konstrukcyjnych.

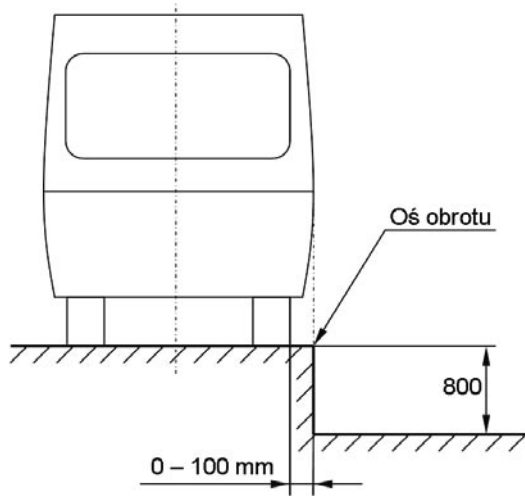
2. Model segmentu

2.1. Sposób przeprowadzania próby

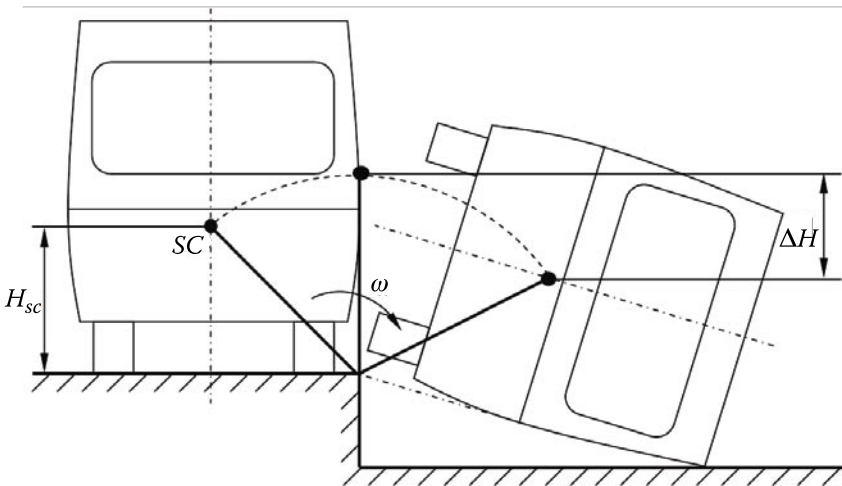
W załączniku 3 do Regulaminu 66 EKG podano procedurę przeprowadzania próby przewrócenia autobusu (rys. 2). Przechylając quasi-statycznie pojazd (podnosząc jedną stronę pojazdu ze stałą dostatecznie małą prędkością — nie przekraczając wartości $0,087 \text{ rad/s}$), doprowadza się do utraty stateczności poprzecznej pojazdu.

Pod wpływem działania siły ciężkości pojazd przewraca się, wykonując obrót wokół osi równoległej do osi podłużnej pojazdu, a w końcowej fazie uderza w podłoże (rys. 3).

Ze względu na długi czas trwania analizy dynamicznej, często pomija się fazę swobodnego przewrotu, a obliczenia numeryczne rozpoczyna się w chwili poprzedzającej styk konstrukcji z podłożem. W takim przypadku energia kinetyczna autobusu musi odpowiadać różnicy energii potencjalnych wynikających z położenia środka ciężkości w chwili jego najwyższego położenia oraz w chwili kontaktu z podłożem.



Rys. 2. Sposób przeprowadzania próby



Rys. 3. Warunki początkowe analizy

Wartość zmiany energii potencjalnej określona jest zależnością:

$$\Delta E_p = M \cdot g \cdot \Delta H, \quad (1)$$

gdzie: M — masa segmentu [kg];
 g — przyspieszenie ziemskie [m/s^2];
 ΔH — zmiana położenia środka ciężkości [m].

Przy założeniu całkowitej zamiany energii potencjalnej na energię kinetyczną, wartość prędkości kątowej autobusu w płaszczyźnie jego obrotu, można wyznaczyć z zależności:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta E_p}{J_{xx}}}, \quad (2)$$

gdzie: ΔE_p — przyrost energii potencjalnej [J];
 J_{xx} — masowy moment bezwładności segmentu względem osi obrotu [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$].

2.2. Model konstrukcji segmentu

W pierwszym etapie pracy opracowano model geometryczny rozważanej konstrukcji. Wszystkie wymiary geometryczne (tabela 1), a w tym wymiary zewnętrzne modelu oraz przekroje kształtowników użytych do budowy konstrukcji, odpowiadają wymiarom segmentu.

Masa całkowita oraz położenie środka ciężkości w modelu numerycznym odpowiadają wartościom charakteryzującym obiekt rzeczywisty (segment). Ze względu na analizę dynamiczną, niezbędne jest także zachowanie odpowiedniego rozkładu mas, a tym samym — masowego momentu bezwładności konstrukcji.

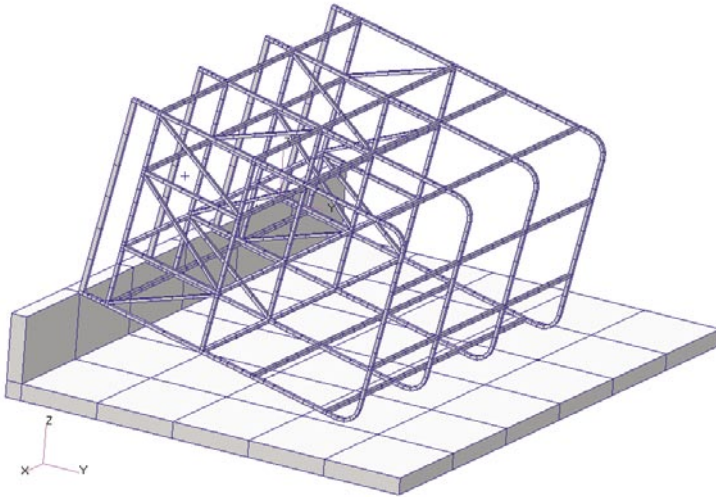
TABELA 1

Wartości parametrów charakteryzujących model

	Parametr	Wartość		
1.	Długość [m]	4,5		
2.	Szerokość [m]	2,5		
3.	Wysokość [m]	3,8		
4.	Masa [kg]	4 170		
5.	Współrzędne środka ciężkości [m]	wzdłuż pojazdu X	poprzecznie do pojazdu Y	wysokość Z
		2,25	0	1,17
6.	Moment bezwładności względem osi obrotu pojazdu J_{xx} [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	15 870		

Na bazie modelu geometrycznego zbudowano model dyskretny konstrukcji segmentu (rys. 4). Do modelowania wykorzystano program MSC Patran, natomiast obliczenia przeprowadzono w programie MSC Marc. Całość konstrukcji

została zamodelowana przy użyciu czterowęzłowych elementów powłokowych. Ze względu na możliwość wystąpienia w trakcie obliczeń uplastycznienia materiału oraz wystąpienia znacznych odkształceń konstrukcji, zastosowane do budowy modelu elementy są dostosowane do obliczeń z uwzględnieniem nieliniowości materiałowych oraz nieliniowości geometrycznych.



Rys. 4. Model dyskretny segmentu w początkowym momencie analizy

Obciążenie konstrukcji stanowi siła bezwładności pochodząca od opóźnienia ruchu konstrukcji, mającego miejsce w momencie uderzenia o podłoże. Na podstawie danych zawartych w tabeli 1 oraz wykorzystując zależność (2), wyznaczono prędkość kątową segmentu przed uderzeniem. Stanowi ona początkowe warunki analizy, a jej wartość wynosi $\omega = 1,96$ rad/s.

Wzajemne oddziaływanie elementów segmentu oraz elementów podłoża zrealizowane jest poprzez zdefiniowanie warunków kontaktu. W obliczeniach uwzględniona jest także siła tarcia działająca pomiędzy przemieszczającą się konstrukcją a podłożem. Na wszystkie elementy konstrukcji działa przyspieszenie ziemskie. Ze względu na możliwość wystąpienia w trakcie analizy dużych odkształceń oraz naprężeń przekraczających granicę plastyczności, do obliczeń przyjęto model materiału uwzględniający jego umocnienie.

Symulacja była przeprowadzana do chwili ustania ruchu, więc w czasie jej trwania uzyskano wystąpienie maksymalnych deformacji. Na każdym kroku obliczeń wyznaczono:

- przemieszczenia liniowe i kątowe poszczególnych węzłów,
- naprężenia w elementach konstrukcji,

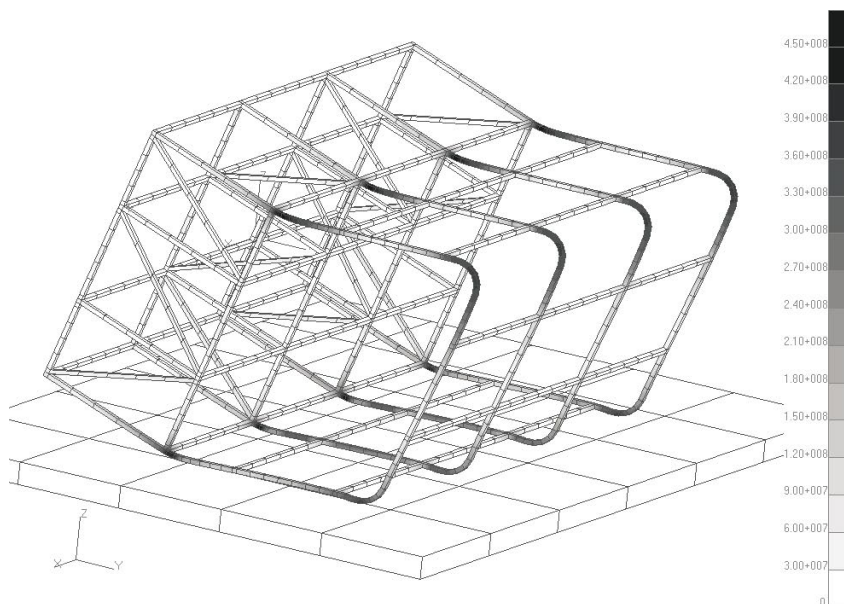
- odkształcenia całkowite i plastyczne we wszystkich elementach,
- siłę normalną występującą w punktach styku konstrukcji z podłożem.

3. Wyniki badań

3.1. Badania numeryczne

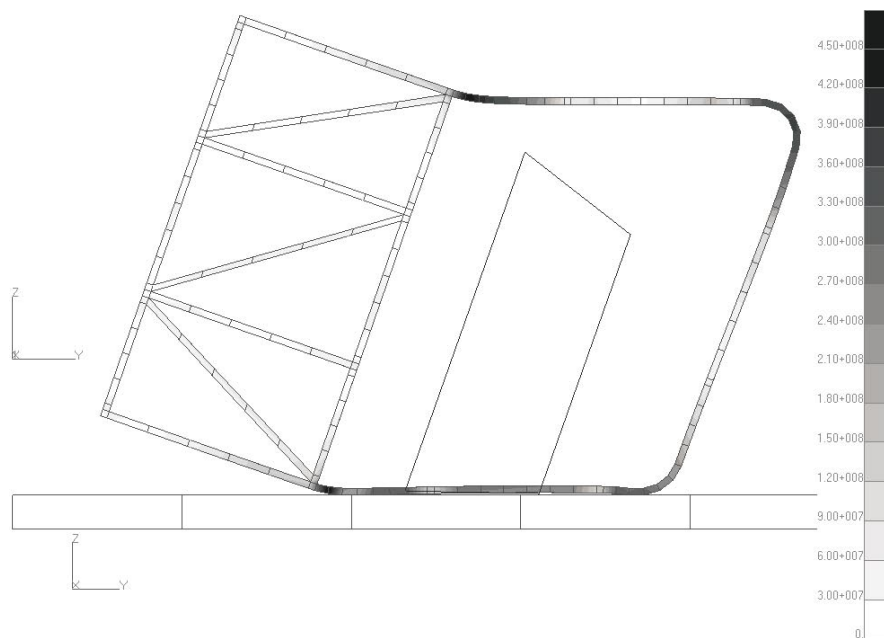
W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano postać deformacji konstrukcji, odkształcenia elementów oraz występujące w nich naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera-Misesa w poszczególnych chwilach czasu.

Na rysunku 5 przedstawiono warstwy naprężeń zredukowanych dla całej konstrukcji segmentu w chwili wystąpienia maksymalnych deformacji konstrukcji.

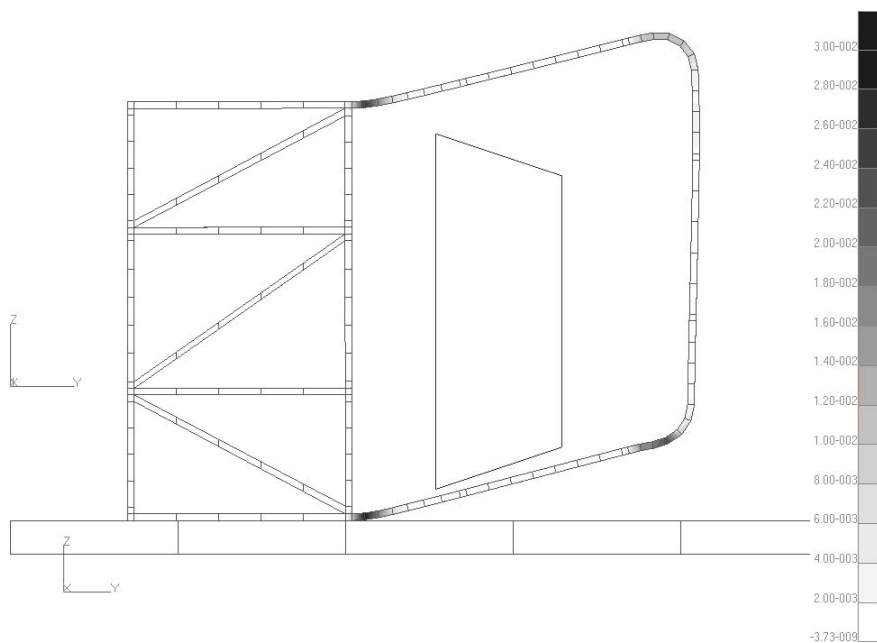


Rys. 5. Warstwy naprężeń zredukowanych dla chwili maksymalnych deformacji

Na rysunku 6 przedstawiono warstwy naprężeń zredukowanych dla środkowych wręg konstrukcji segmentu w chwili maksymalnych deformacji. Na rysunku tym widać naruszenie przestrzeni chronionej zdefiniowanej w Regulaminie 66. Na rysunku 7 przedstawione są warstwy trwałych odkształceń konstrukcji segmentu po przeprowadzeniu próby.



Rys. 6. Warstwy naprężeń zredukowanych wybranego elementu dla chwili maksymalnych deformacji

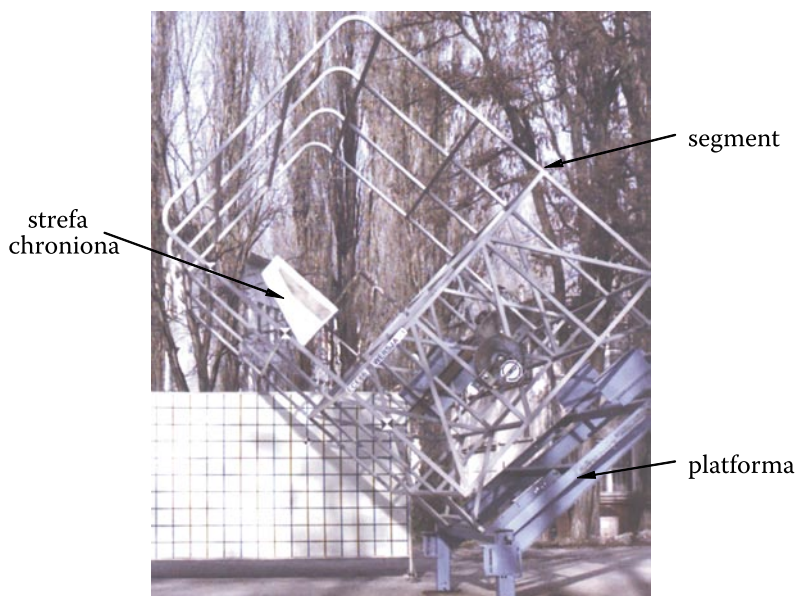


Rys. 7. Warstwy trwałych odkształceń wybranego elementu konstrukcji

3.2. Badania eksperymentalne

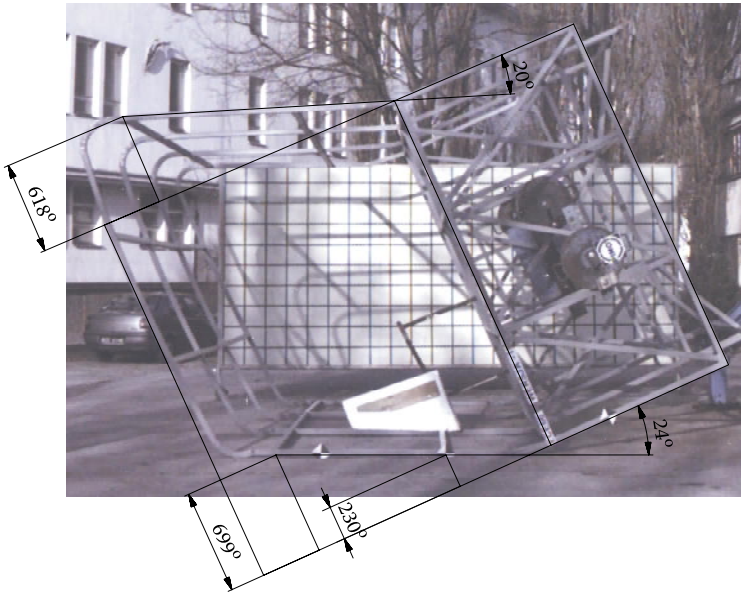
Wyniki analizy numerycznej muszą być zweryfikowane na drodze eksperymentalnej. W tym celu przeprowadzono próbę wywrócenia segmentu. Próbę przeprowadzono zgodnie z warunkami określonymi w Regulaminie 66 EKG ONZ.

Na rysunku 8 przedstawiona jest konstrukcja segmentu przygotowana do badań. Znajduje się ona na platformie, która posiada możliwość ruchu wokół osi obrotu. Podczas badań zachowanie konstrukcji było rejestrowane przy użyciu kamery, natomiast pomiary deformacji plastycznych występujących w elementach segmentu na skutek uderzenia w podłoże miały miejsce po przeprowadzeniu próby.



Rys. 8. Widok konstrukcji segmentu przed próbą

Na rysunku 9 przedstawiony jest widok odkształcającej się konstrukcji segmentu podczas przewrotu dla chwili wystąpienia maksymalnych deformacji. Można na nim zaobserwować naruszenie strefy chronionej. Na rysunku tym naniesione są również odpowiednie wartości deformacji, które w dalszym etapie posłużyły do porównań z wynikami obliczeń numerycznych.



Rys. 9. Segment w chwili maksymalnych deformacji

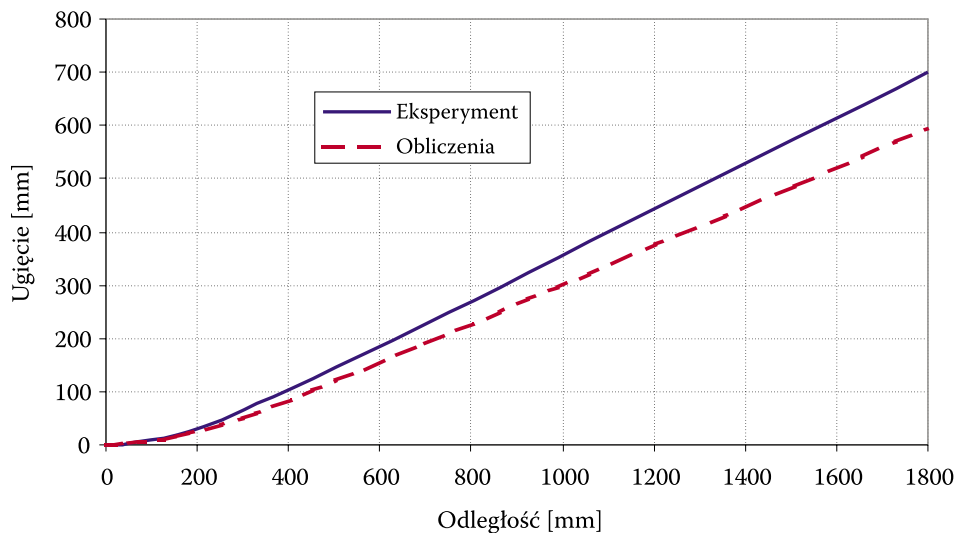
3.3. Weryfikacja metody

W celu porównania wyników obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych dokonano pomiarów przemieszczeń poprzecznych słupków bocznych. Rezultaty przedstawiono na rysunku 10. W tabeli 2 zamieszczono wyniki pomiarów w punktach charakterystycznych oraz wyniki błędu względnego rezultatów badań numerycznych w stosunku do eksperymentu.

TABELA 2

Porównanie wielkości charakterystycznych przy maksymalnej deformacji konstrukcji

	Eksperyment	Obliczenia numeryczne
Ugięcie kształtownika		
spód okna [mm]	230	190
Błąd [%]	-16,3	
górze okna [mm]	699	594
Błąd [%]	-15,0	
Kąt ugięcia kształtownika [°]	24	21
Błąd [%]	-12,5	



Rys. 10. Ugięcie kształtownika w funkcji odległości od podłogi segmentu

4. Podsumowanie

Zarówno dla obliczeń numerycznych, jak i eksperymentu dla założonych warunków próby przewrotu segmentu uzyskano naruszenie strefy chronionej. Na skutek uderzenia w podłozę w konstrukcji nastąpiły trwałe odkształcenia.

Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych wykazują zbieżność z wynikami badań eksperymentalnych. Różnica między nimi wyniosła około 15% zarówno dla deformacji poprzecznych, jak i odkształceń kątowych.

Dobra zgodność pomiędzy wynikami obu badań jest m.in. rezultatem dokładnego odwzorowania konstrukcji segmentu. Było to możliwe ze względu na jej nieskomplikowaną budowę (konstrukcja spawana, wykonana z kształtowników o znanych przekrojach).

Dokonane porównanie świadczy o poprawności przyjętego modelu, a pozytywna weryfikacja upoważnia do podjęcia dalszych prac, mających na celu poszukiwanie korzystnych rozwiązań konstrukcji struktury nośnej autobusów.

Wykonano w ramach pracy badawczej nr 5 T12C 053 25.

Artykuł wpłynął do redakcji 23.11.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2006 r.

LITERATURA

- [1] Regulamin nr 66 EKG ONZ *Jednolite przepisy dotyczące homologacji dużych pojazdów do przewozu osób w zakresie wytrzymałości konstrukcji.*
- [2] E. RUSIŃSKI, *Zasady projektowania konstrukcji nośnych pojazdów samochodowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [3] A. GÓRSKI, J. KARLIŃSKI, M. KOWALCZYK, E. RUSIŃSKI, *Numeryczna symulacja utraty stateczności ruchu autobusu według Regulaminu 66 EKG ONZ*, SYSTEMS, Journal of Transdisciplinary Systems Science, vol. 9, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.

W. BORKOWSKI, Z. HRYCIÓW, A. MUSZYŃSKI, L. SOKALSKI

**Verification of numerical simulation of bus loss of motion stability
according to ECE regulation 66**

Abstract. In the paper, some problems of bus loss of motion stability were described. The investigation and design of the supporting structure in passive safety point of view were presented according to ECE Regulation 66. The verification results of numeric simulation of the bus roll over were presented.

Keywords: numerical analysis, passive safety, ECE Regulation 66, bus — structural strength

Universal Decimal Classification: 629.114.5