

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

3(2)/2014, 29-37

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Przemysław OSOWSKI, Tomasz PIĄTKOWSKI

**BADANIA NUMERYCZNE I WERYFIKACJA
EKSPERYMENTALNA PROCESU ZDERZENIA OPAKOWANIA
Z NIEODKSZTAŁCALNYM PODŁOŻEM**

Streszczenie: Praca dotyczy modelowania oraz symulacji procesu zderzenia opakowania z nieodkształcalnym podłożem w środowisku LS-DYNA. W opakowaniu zastosowano wypełnienie przeciwwstrząsowe wykonane z EPS 100, które zdefiniowano za pomocą modelu *MAT_LOW_DENSITY_FOAM. W celu weryfikacji wyników symulacji przeprowadzono badania eksperymentalne. Środowisko modelowania LS-DYNA może być wykorzystane jako narzędzie wspomagające proces projektowania optymalnych właściwości przeciwwstrząsowych opakowań.

Słowa kluczowe: opakowanie, zjawisko zderzenia, modelowanie

1. WSTĘP

Rozwój gospodarki w państwie jest zależny m.in. od importu oraz eksportu dóbr. Powodują one wzrost liczby przewozów ładunków pomiędzy partnerami handlowymi, które mają zasięg globalny.

Produkty umieszczane są w opakowaniach jednostkowych w celu ochrony zawartości przed uszkodzeniem, umożliwienia automatycznej identyfikacji w procesie dystrybucji oraz usprawnienia mechanizacji przeładunkowych procesów transportowych. Rola opakowania nabrała większego znaczenia przy coraz bardziej skomplikowanych sposobach dystrybucji dóbr [4]. Powodem tego jest duża różnorodność opakowań. Najczęściej klasyfikowane są ze względu na ich przeznaczenie. Według tego kryterium można je podzielić na [5]:

- jednostkowe – chronią tylko przed ubytkiem ilościowym, nie zapewniają jednak odpowiedniej ochrony podczas transportu i magazynowania,
- transportowe – zapewniają ochronę zawartości przed narażeniami mechanicznymi, klimatycznymi i biologicznymi w czasie magazynowania i transportu,
- zbiorcze – stanowią opakowania pośrednie między opakowaniami jednostkowymi a transportowymi.

mgr inż. Przemysław OSOWSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: przemyslaw.osowski@utp.edu.pl
dr hab. inż. Tomasz PIĄTKOWSKI, prof. nadzw. UTP, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: tomasz.piatkowski@utp.edu.pl

Najbardziej szczegółowo badane są opakowania transportowe. Można je uznać koncepcyjnie za urządzenie, które chroni wrażliwy produkt przed szkodliwym środowiskiem. Decydujący wpływ na własności ochronne opakowań ma odpowiedni dobór właściwości mechanicznych, np. wytrzymałości na ściskanie, odporności na zderzenie oraz zdolności tłumienia drgań materiału [8]. Jedną z częstszych przyczyn uszkodzenia ładunku jest uderzenie spowodowane nagłym kontaktem z podłożem, innymi ładunkami lub elementami wykonawczymi urządzeń przeladunkowo-manipulacyjnych. Zjawisko zderzenia powoduje błyskawiczny wzrost przyspieszenia przez pewien krótki czas. Skutkuje to powstaniem sił reakcji wywieranych na obiekt, które mogą spowodować jego uszkodzenie. W celu zmniejszenia wartości tych sił stosuje się materiały przeciwwstrząsowe (np. EPS (polistyren ekspandowany), tekturę falistą, gąbkę) [1].

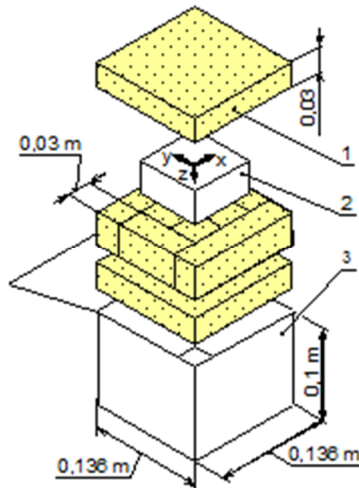
W badaniach podjęto próbę zamodelowania i symulacji procesu zderzenia opakowania z nieodkształcalnym podłożem, spowodowanego spadkiem swobodnym z wysokości. Przyjęto, że wypełnieniem opakowania (wykonanego z tektury falistej) pełniącym rolę przeciwdударową jest EPS 100. Badania przeprowadzono z uwzględnieniem wymagań normy [7], dotyczącej badania materiałów (np. do opakowań) przy swobodnym spadku. Wyniki otrzymane z symulacji modelu zderzenia w środowisku LS-DYNA zweryfikowano podczas badań eksperymentalnych. Zasadniczym celem przeprowadzonych badań jest dokonanie oceny zdolności środowiska LS-DYNA do odtwarzania rzeczywistego przebiegu procesu zderzenia zarejestrowanego podczas testów doświadczalnych (w odniesieniu do przykładowego opakowania). Pozytywny wynik tej oceny będzie motywacją do podjęcia dalszych badań nad opracowaniem skutecznej metodyki projektowania optymalnych zdolności przeciwwstrząsowych opakowań na podstawie środowiska LS-DYNA z jednoczesną minimalizacją konieczności wykonywania licznych, czasochłonnych i kosztownych badań eksperymentalnych.

2. WARUNKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH SWOBODNEGO SPADKU OBIEKTU NA NIEODKSZTAŁCALNE PODŁOŻE

Wyniki pomiarów podczas swobodnego spadku zostały zarejestrowane trójosiowym czujnikiem przyspieszeń SAVER3L30 firmy Lansmont.

Rejestrator (blok aluminium o wymiarach $0,076 \times 0,076 \times 0,04$ m i masie 0,4 kg) został umieszczony we wnętrzu ładunku (rys. 1). Opakowanie (o wymiarach $0,136 \times 0,136 \times 0,1$ m) wykonane jest z trójwarstwowej tektury falistej. Funkcje przeciwwstrząsowe pełni wypełnienie ze styropianu EPS 100 o grubości 0,03 m [6].

Tak zmontowany ładunek został poddawany serii prób swobodnego spadku z wysokości $H = 0,3$ m [8]. Dobrana wysokość odpowiada realnemu narażeniu na upadek dla ok. 20% obiektów podczas całego procesu transportowego od magazynu do odbiorcy [8].



Rys. 1. Struktura ładunku przygotowanego do prób swobodnego spadku: 1 – elementy przeciwwstrząsowe, 2 – rejestrator przyspieszeń, 3 – opakowanie kartonowe [6]

Fig. 1. Unit load structure prepared for dropping test: 1 – cushioning elements, 2 – acceleration recorder, 3 – fiberboard package [6]

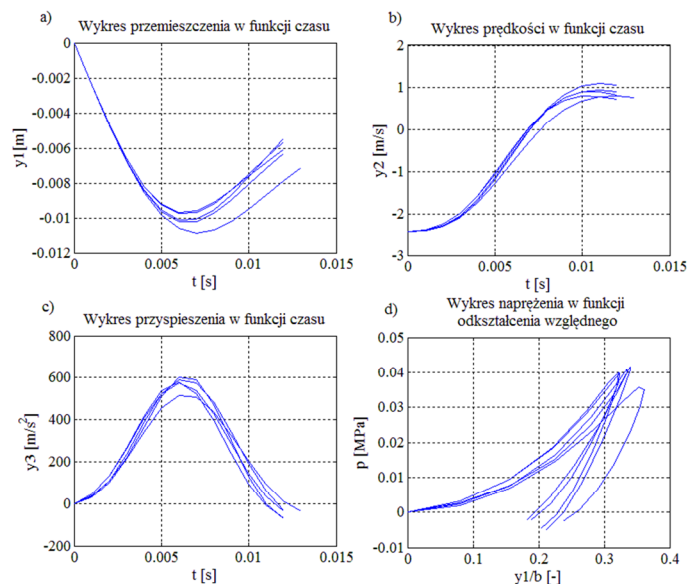
Z danej wysokości ładunek był zrzucany pięciokrotnie na dolną ścianę – ścianę prostopadłą do kierunku osi z. Podczas badań ładunek manipulowano i pozycjonowano ręcznie.

3. WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 2c przedstawiono wykresy przyspieszeń zarejestrowane przez czujnik podczas prób zderzenia. Z wykresów tych można odczytać czas, amplitudę i przebieg zderzenia.

Na rysunkach 2a i 2b przedstawiono wykresy przemieszczeń i prędkości rejestratora. Dane do tych wykresów wyznaczono poprzez jednokrotne oraz dwukrotne całkowanie przyspieszeń zaprezentowanych na rysunku 2c.

Wykres naprężeń materiału przeciwwstrząsowego w funkcji odkształcenia względnego (rys. 2d) opracowany został w środowisku Matlab. Przedstawia przebieg obciążenia, jak i odciążenia wypełnienia opakowania podczas zderzenia z podłożem. Wykres ten ma charakter funkcji hiperbolicznej – początkowo, przy małych wartościach naprężeń występuje duży wzrost odkształcenia względnego. Dokładny opis przebiegu tego wykresu zamieszczono w następnym rozdziale.

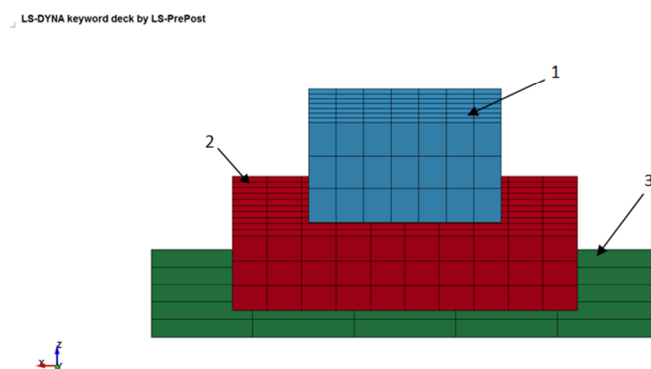


Rys. 2. Wykres: a) przyspieszenia rejestratora w funkcji czasu, b) prędkości rejestratora w funkcji czasu, c) przemieszczenia rejestratora w funkcji czasu, d) naprężeń w funkcji odkształcenia względnego materiału przeciwwstrząsowego

Fig. 2. Plot of: a) recorder movement in the function of time, b) recorder velocity in the function of time, c) recorder acceleration in the function of time, d) stress in the function of relative strain of cushioning material

4. MODELOWANIE ZDERZENIA W ŚRODOWISKU LS-DYNA

Model numeryczny (opracowany w środowisku LS-DYNA, rys. 3) odzwierciedla obiekty i warunki występujące podczas badań eksperymentalnych.



Rys. 3. Model numeryczny prób zderzenia: 1 – rejestrator, 2 – materiał przeciwwstrząsowy, 3 – sztywne podłoże

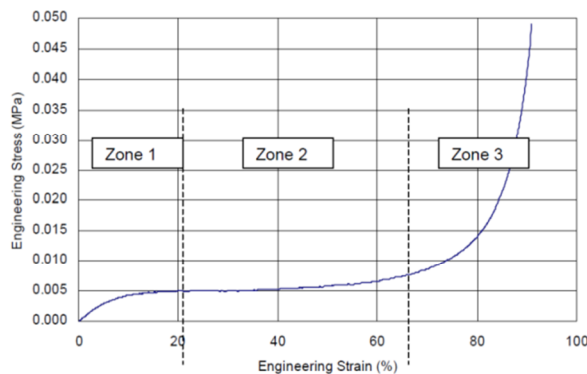
Fig. 3. The numerical model of impact test: 1 – recorder, 2 – cushioning material, 3 – rigid substrate

Model składa się z 3 elementów: 1 – rejestratora, 2 – materiału przeciw-wstrząsowego, 3 – sztywnego podłoża. Element (3) pełni rolę wizualną, zastosowano go w celu przedstawienia sztywnej powierzchni. Aby wygenerować tę powierzchnię, wykorzystano polecenie *RIGIDWALL_PLANAR_FORCE [3]. Definicja kontaktu pomiędzy podłożem (3) a materiałem przeciwwstrząsowym (2) określona jest wewnątrz tego polecenia. Interakcje pomiędzy rejestratorem (1) a wypełnieniem (2) wprowadzono do modelu, posługując się kontaktem *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE [3].

Materiał, z którego został wykonany ładunek (aluminium), zdefiniowano za pomocą polecenia *MAT_ELASTIC [3], które najlepiej naśladuje liniową elastyczność materiału metalicznego zgodnie z charakterystyką naprężeń w funkcji odkształcenia względnego.

Styropian EPS 100 jest trudny w modelowaniu – to pianka o zamkniętych komórkach, która ma strukturę wielofazową. Właściwości materiału zależne są od postaci osnowy materiału, jak i mikrostruktury porów. Wytrzymałość tego materiału rozpatrywana jest głównie pod względem obciążeń na ściskanie. Wykres naprężeń ściskających w funkcji odkształcenia składa się z trzech stref (rys. 4) [2]:

- strefa 1 – we wstępnej strefie obciążenia przebieg wykresu jest zależny od sztywności osnowy,
- strefa 2 – w zamkniętych komórkach, które występują w styropianie, znajduje się gaz, który poddawany jest kompresji,
- strefa 3 – komórki w tej strefie ulegają rozerwaniu (zgnieceniu), co powoduje, że materiał będzie się zachowywać jak w strefie 1.

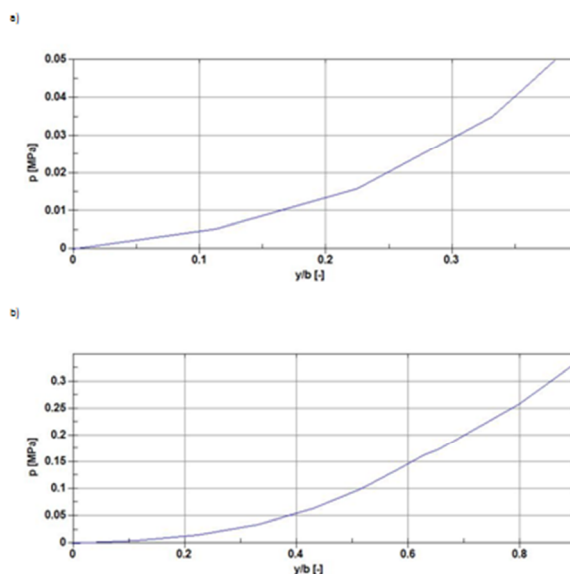


Rys. 4. Wykres naprężenia w funkcji odkształcenia względnego podczas ściskania pianki [2]
 Fig. 4. Plot of stress in the function of relative strain during compression of foam [2]

Środowisko LS-DYNA oferuje wiele modeli materiałów, które powinny symulować niektóre zachowania poszczególnych pianek [2]. W badaniach własnych wykorzystano materiał *MAT_LOW_DENSITY_FOAM [3], który spośród modeli materiałów proponowanych w pracy [2] najlepiej odzwierciedla przebieg rozpatrywanego procesu zderzenia. Inne materiały nie pozwalały od-

tworzyć wyników z badań doświadczalnych, gdyż uzyskiwano zbyt krótki czas trwania zderzenia.

W definiowanym materiale wymagana jest krzywa opisująca przebieg naprężenia w funkcji odkształcenia materiału. Zdefiniowana w tym celu krzywa (rys. 5b, w sekcji *DEFINE) ma ścisły związek z wynikami badań doświadczalnych. Krzywa ta stanowi ekstrapolację wykresu z rysunku 5a (wyznaczonego na podstawie rys. 2d) aż do osiągnięcia wartości 0,9 odkształcenia względnego.



Rys. 5. Przebieg naprężenia w funkcji odkształcenia względnego uzyskany na podstawie badań doświadczalnych: a) krzywa przed ekstrapolacją, b) krzywa po ekstrapolacji

Fig. 5. Course of the stress in the function of strain obtained from experimental tests: a) curve before extrapolation, b) curve after extrapolation

Zdefiniowano również prędkość, jaką osiągnął badany obiekt w chwili inicjacji kontaktu z podłożem, którą obliczono ze wzoru:

$$v = \sqrt{2 \times g \times h} \quad (1)$$

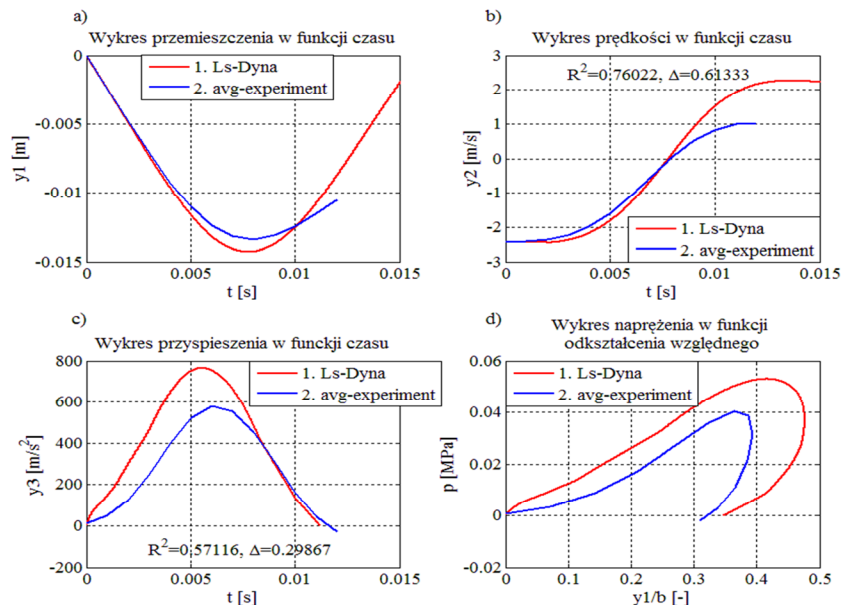
gdzie:

- v – prędkość ładunku w momencie zderzenia z podłożem,
- g – przyspieszenie ziemskie,
- h – wysokość swobodnego spadku ładunku.

Prędkość tę wprowadzono do środowiska LS-DYNA za pomocą komendy *INITIAL_VELOCITY [3], a grawitację – stosując *LOAD_GRAVITY_PART.

5. WYNIKI SYMULACJI

Na rysunku 6 przedstawiono wykresy przemieszczeń, prędkości i przyspieszenia elementu (wg modelu, rys. 3) oraz wykres naprężenia w funkcji odkształcenia względnego materiału przeciwwstrząsowego, otrzymane podczas symulacji zderzenia ze sztywnym podłożem (krzywa oznaczona odnośnikiem (1)). Na rysunku tym zamieszczono również uśrednione wartości poszczególnych charakterystyk (oznaczone odnośnikiem (2)), które wyznaczono na podstawie badań eksperymentalnych (wg rys. 2).



Rys. 6. Wykresy parametrów ruchu rejestratora wyznaczone na podstawie symulacji (krzywa oznaczona odnośnikiem 1) i badań eksperymentalnych (krzywa oznaczona odnośnikiem 2): a) przemieszczenie, b) prędkość, c) przyspieszenie, d) naprężenie materiału przeciwwstrząsowego w funkcji odkształcenia względnego

Fig. 6. Plot of recorder motion parameters determined from the simulation (curve indicated with reference 1) and experimental tests (curve indicated with reference 2): a) acceleration, b) velocity, c) displacement, d) stress in the function of relative strain of cushioning material

W celu oceny dopasowania uzyskanych wyników symulacji z eksperymentalnymi zastosowano współczynnik determinacji R^2 oraz błąd względny Δ :

$$\Delta = \frac{|\hat{W}_{\max} - W_{\max}|}{W_{\max}} \quad (2)$$

gdzie:

\hat{W}_{\max} , W_{\max} – maksymalna wartość (np. przyspieszenia lub prędkości) wyznaczona na podstawie wyników symulacji (1) oraz badań doświadczalnych (2).

Na podstawie analizy wykresów można stwierdzić, że dane uzyskane podczas symulacji są porównywalne z danymi eksperymentalnymi – $R^2 > 0$, jednakże nie w sposób idealny. Najwyższa zgodność przebiegu charakterystyki wystąpiła dla wykresu prędkości ($R^2 = 0,76022$), lecz najmniejszy błąd uzyskano pomiędzy maksymalnymi wartościami przyspieszeń ($\Delta = 0,29867$). Rozbieżność wyników można wytłumaczyć tym, że podczas eksperymentu w opakowaniu znajdowała się jeszcze tektura, która dodatkowo łagodziła skutki zderzenia, oraz faktem, że zdefiniowany materiał nie odzwierciedla idealnie właściwości EPS 100. Rozbieżności wyników badań (doświadczalnych i numerycznych) znajdują się w zakresie bezpiecznym dla produktów – opakowania (projektowane na podstawie wyników badań numerycznych) będą przystosowane do przenoszenia większych przeciążeń niż rzeczywiście im nadawanych.

6. WNIOSKI

W pracy przedstawiono propozycję modelowania ładunku jednostkowego, który poddany jest swobodnemu spadkowi z zadanej wysokości. Materiał niejednorodny (EPS 100), który pełni rolę ochronną, jest tworzywem trudnym do zamodelowania. Jest to wynikiem złożonej struktury tego typu materiałów, która powoduje różnorodność w zachowaniu elastyczno-plastycznym pod wpływem nacisku. Podczas tworzenia modelu numerycznego (w środowisku LS-DYNA) konieczne jest wprowadzenie danych uzyskanych z badań eksperymentalnych – kalibrujących model teoretyczny. Dzięki temu za pomocą symulacji można skutecznie przewidzieć przebieg procesu zdarzenia przy innych danych wejściowych bez potrzeby wykonywania ponownych badań eksperymentalnych. Początkowe wyniki badań numerycznych nie pokrywają się w pełni z danymi eksperymentalnymi. Nie powoduje to jednak ich dyskwalifikacji. Przyspieszenie jest większe od zarejestrowanych podczas badań doświadczalnych. Powoduje, że próg bezpieczeństwa podczas projektowania jest podwyższony o nieznaczną wartość ($\Delta = 0,29867$).

Badania nad powyższym zagadnieniem będą kontynuowane w celu dokładniejszego odzwierciedlenia zachowania materiałów przeciwwstrząsowych podczas procesu zderzenia. Dzięki temu zmniejszony zostanie nakład czasu potrzebny do przeprowadzania badań, jak również koszt niezbędny do ich wykonania.

LITERATURA

- [1] KIRKPATRICK J.: Corrugated Cushion Design Handbook. A Handbook for the Effective Use of Corrugated Fiberboard as a Cushioning Medium in Protective Packaging. Victoria University, Melbourne, Australia, www.staff.vu.edu.au/~sek/Handbook%20corrugated%20part%201.pdf (dostęp 28.11.2013).
- [2] LOBO H., CROOP B.: Selecting Material Models for the Simulation of Foams in LS-DYNA. 7th European LS-DYNA Conference DatapointLabs 2009, New York.
- [3] LS-DYNA Keyword User's Manual. Vol. I, II. August 2012, Version 971 R6.1.0, Livermore Software Technology Corporation.

- [4] MOKRZYSCZAK H.: Ładunkoznawstwo. Wyd. Komunikacji i Łączności, Bydgoszcz 1985.
- [5] NIERZWICKI W.: Opakowania. Wybrane zagadnienia. Wyd. Wyższej Szkoły Morskiej, Gdynia 1997.
- [6] PIĄTKOWSKI T.: Analiza i modelowanie procesu sortowania strumienia małogabarytowych ładunków jednostkowych. Wyd. Uczeln. Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2010.
- [7] PN-EN 22248:2001P: Opakowania – Opakowania transportowe z zawartością – Metoda badania odporności na uderzenia przy swobodnym spadku.
- [8] SCHUENEMAN H.: Packaging engineering and testing. A step-by-step approach for protection of fragile products. Package Test Laboratory. Westpak Inc., San Jose, USA, www.westpak.com/techpapers/08_package_engineering_design_testing.pdf (dostęp 28.11.2013).

NUMERICAL RESEARCH AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE IMPACT PROCESS OF THE PACKAGE WITH RIGID SUBSTRATE

Summary: This article concerns about modeling and simulation of impact process with rigid substrate in LS-DYNA environment. In a package was used cushioning fulfillment made of EPS 100, which was defined with model *MAT_LOW_DENSITY_FOAM. The verification of simulation results the experimental research was conducted. The environment modeling LS-DYNA can be used as a tool to assist the design process of optimal properties of cushioning packages.

Key words: package, impact phenomenon, modeling