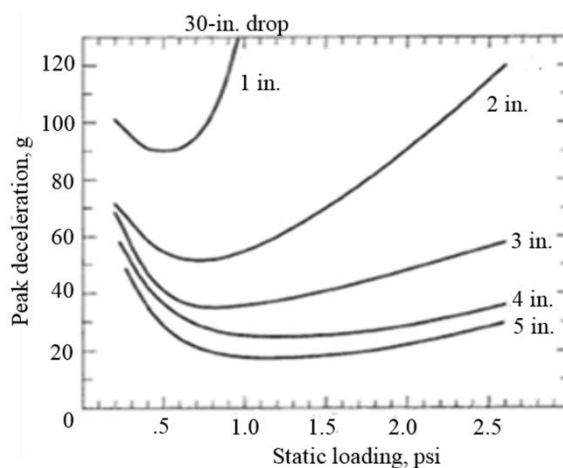


NIESPRĘŻYSTE MODELE ZDERZENIA PRZY SWOBODNYM SPADKU OPAKOWAŃ

Przemysław Osowski¹

1. WSTĘP

Materiały przeciwwstrząsowe wykorzystywane w opakowaniach pełnią wiele funkcji. Jedną z ważniejszych jest ochrona zawartości opakowania przed oddziaływaniem mechanicznym spowodowanym zderzeniem, będącym główną przyczyną uszkodzenia ładunków podczas swobodnego spadku na podłoże. Samo zderzenie nie powoduje uszkodzenia. Powoduje je nagłe zatrzymanie się obiektu w wyniku zetknięcia się z podłożem. Przyczyną uszkodzenia jest intensywny wzrost przyspieszenia, jak również czas jego trwania (zazwyczaj 2-50 ms) [Yam 2009]. Wartość maksymalnego przyspieszenia, uzyskiwanego przez zawartość ładunku, zależy od wysokości upadku i cech materiału przeciwwstrząsowego: jego rodzaju, grubości i obciążenia statycznego. W celu identyfikacji zachowania się materiału przeciwwstrząsowego podczas zderzenia wykorzystuje się jego charakterystykę, tzw. krzywą amortyzacji (ang. *cushion curve*) [Yam 2009]. Przykładowa charakterystyka przedstawiona na rysunku 1 opisuje zależność pomiędzy obciążeniem statycznym wypełnienia (wyrażonym ilorazem siły ciężkości zawartości ładunku i powierzchni jego podparcia) a maksymalnym przyspieszeniem doznany przez ładunek. Za pomocą tej krzywej można wyznaczyć przedział obciążenia statycznego, w którym materiał chroniący jest najbardziej efektywny, a także przedziały, których należy unikać ze względu na zagrożenie uszkodzenia produktu [Kirkpatrick 2013].



Rys. 1. Krzywa amortyzacji [Yam 2009]

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Mechaniki Stosowanej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: przemyslaw.osowski@utp.edu.pl

W celu określenia właściwości materiału chroniącego (sprowadzające się do uzyskania danych do wygenerowania krzywej amortyzacji) stosuje się badania eksperymentalne. Muszą być one jak najprostsze, oddające naturę zderzenia występującego w procesie transportowym oraz opisane jasnymi i jednoznacznymi zasadami. Wytyczne dotyczące zastosowania wymaganych urządzeń, jak i przebiegu badań eksperymentalnych są określone w normach [ASTM 2011, PN-O79003:1988P]. Badania te opierają się na próbach zderzeniowych bijaka spowodowanych swobodnym spadkiem z wysokości na materiał przeciwwstrząsowy. Eksperymenty przeprowadzane są wielokrotnie dla zmieniających z zadaniem krokiem: masy bijaka, wysokości swobodnego spadku i grubości testowanego materiału przeciwwstrząsowego. Ponadto dla celów analiz statystycznych poszczególne próby powinny być wykonywane wielokrotnie.

Wyznaczenie wspomnianej charakterystyki jest długotrwałe i kosztowne, gdyż dla jednego materiału badania zajmują 175 h oraz wymagają wykonania 10 500 prób [Gilbert i Batt 2015]. Z prezentowanych danych wynika, że istnieje zapotrzebowanie na metody, które wspomogą procedurę wyznaczania krzywej amortyzacji, minimalizując czas potrzebny do wykonania żmudnych i pracochłonnych testów eksperymentalnych. Rozwiązaniem tego problemu jest posłużenie się niesprężystymi modelami zderzeń, które odzwierciedlą proces zderzenia materiałów przeciwwstrząsowych z przeszkodą. W pracy dokonano przeglądu trzech niesprężystych modeli zderzeń dostępnych we współczesnej literaturze. Przedstawione modele należą do grupy modeli ciągłych. Druga grupa modeli – modele dyskretne – została pominięta, gdyż oparta jest na hipotezie ciał sztywnych i nie może być zastosowana do opisu materiałów przeciwwstrząsowych poddawanych dużym odkształceniom [Gilardi i Sharf 2002].

Prezentowane w pracy modele ciągłe wykorzystują podstawowe parametry materiałowe, takie jak moduł Younga oraz wykres naprężenia ściskającego w funkcji odkształcenia względnego. Na przykładzie wybranego modelu wyznaczono maksymalne przyspieszenia, które posłużyły do stworzenia wykresu krzywej amortyzacji, który następnie poddano weryfikacji eksperymentalnej.

Osiągnięcie akceptowalnych wyników z przeprowadzonej analizy będzie motywacją do podjęcia dalszych wysiłków nad opracowaniem skutecznego modelu niesprężystego zderzenia w celu wyznaczania właściwości przeciwwstrząsowych wypełnień opakowań i efektywnego ich projektowania.

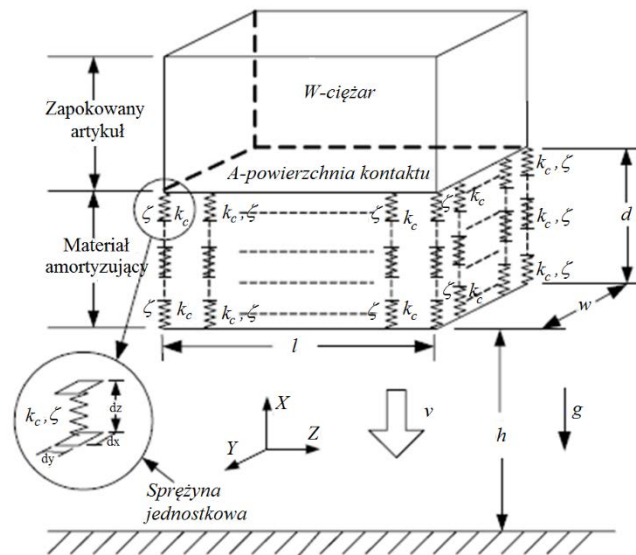
2. NIESPRĘŻYSTY MODEL ZDERZENIA WANG-LOWA

Matematyczny model materiału przeciwwstrząsowego został przedstawiony jako układ wibracyjny, który składa się z wielu nieliniowych sprężyn jednostkowych o sztywności k_c , który zmienia się wraz z ugięciem sprężyny x_c i współczynnikiem tłumienia względnego ζ . Materiał ten wraz z zaproponowanym ładunkiem poddawany jest swobodnemu upadkowi z wysokości h (rys. 2).

Podczas badań pod uwagę brane są tylko wartości maksymalne odkształcenia materiału przeciwwstrząsowego oraz maksymalne przyspieszenia ładunku w kierunku pionowym.

Równanie ruchu sprężyny jednostkowej wyrażamy wzorem [Wang *et al.* 2005]:

$$m_c \ddot{x}_c + c_c(x_c) \dot{x}_c + k_c(x_c) x_c = 0 \quad (1)$$



Rys. 2. Niesprężysty model zderzenia Wang-Lowa [Wang *et al.* 2005]

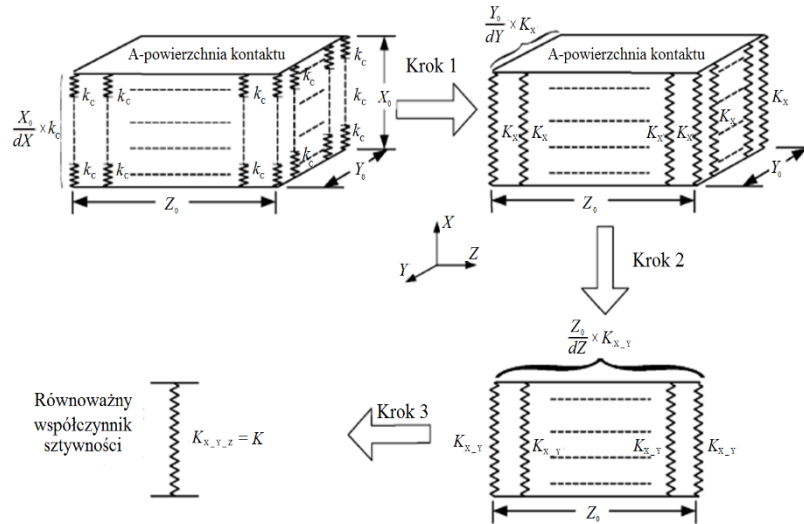
w którym są wykorzystywane następujące symbole [Wang *et al.* 2005]:

$$\omega_c(x_c) = \sqrt{\frac{k_c}{m_c}}, \quad \varsigma = \frac{c_c(x_c)}{2\sqrt{k_c(x_c)m_c}} \quad (2)$$

gdzie:

- x_c – ugięcie sprężyny jednostkowej podczas zetknięcia z podłożem,
- m_c – masa zawartości ładunku przypadająca na sprężynę jednostkową,
- ω_c – nietłumiona częstość drgań,
- c_c – współczynnik tłumienia sprężyny jednostkowej.

Z powodu trudności w wyznaczeniu ugięcia w poszczególnych sprężynach jednostkowych w równaniu (1) autor zaproponował wyznaczenie zastępczej sztywności układu. Polega to na tym, że układ jest całkowany w poszczególnych płaszczyznach X, Y i Z (rys. 3). Najpierw (krok 1) wyznaczana jest sztywność zastępcza zgodnie z pionowym kierunkiem spadku (osi X), gdzie sztywność jednostkowa sprężyn traktowana jest jako układ szeregowy. Następnie (krok 2 i 3) tworzona jest sztywność zastępcza w kierunkach Y i Z. Sprężyny jednostkowe traktowane są jako układ równoległy. Należy zwrócić uwagę, że na rysunku 3 w poszczególnych krokach pojawiają się elementy $\frac{X_0}{dX}, \frac{Y_0}{dY}, \frac{Z_0}{dZ}$. Przedstawiają one liczbę sprężyn jednostkowych występujących w poszczególnych osiach X, Y i Z.

Rys. 3. Łączenie sprężyn jednostkowych [Wang *et al.* 2005]

Skoro materiał przeciwwstrząsowy w modelu matematycznym traktowany jest jako izotropowy, to parametry takie, jak naprężenie σ i odkształcenie względne ε są jednakowe. Dzięki temu sztywność w każdej sprężynie jednostkowej jest taka sama, przez co sztywność zastępcza sprężyny przyjmie postać [Wang *et al.* 2005]:

$$K = \frac{\sigma Y_0 Z_0}{\varepsilon X_0} = \frac{\sigma A}{\varepsilon d} \quad (3)$$

gdzie:

- A – powierzchnia kontaktu przedstawiona na rysunku 2,
- d – grubość materiału amortyzującego.

Wykorzystując równania (2) i (3) możemy uzyskać równanie na zastępczy współczynnik tłumienia [Wang *et al.* 2005]:

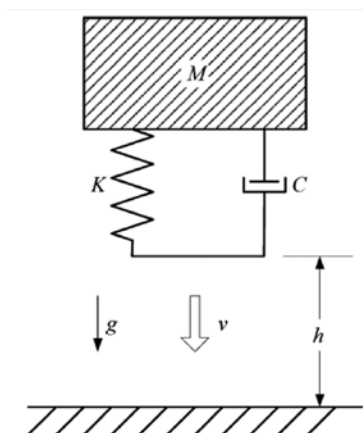
$$C = 2\zeta \sqrt{KM} = 2\zeta \sqrt{\frac{\sigma AM}{\varepsilon d}} \quad (4)$$

gdzie:

- ζ – współczynnik tłumienia względnego,
- M – masa całkowita artykułu.

Po uwzględnieniu równań (3) i (4) interpretację geometryczną struktur przeciwwstrząsowych opakowania wraz z jego zawartością można przedstawić tak, jak na rysunku 4, a równoważny model matematyczny ująć równaniem [Wang *et al.* 2005]:

$$M\ddot{x}_c + C\dot{x}_c + Kx_c = 0 \quad (5)$$



Rys. 4. Model swobodnego spadku o jednym stopniu swobody [Wang *et al.* 2005]

Na podstawie powyższego modelu wyznaczane jest maksymalne przyspieszenie masy M . Wiadomo, że podczas swobodnego spadku maksymalne przyspieszenie występuje w momencie nagłego zahamowania obiektu (gdy $\dot{x} = 0$). W tym momencie cała energia kinetyczna opakowania jest absorbowana oraz rozpraszana przez materiał przeciwwstrząsowy. Można ją wyznaczyć stosując dwa warunki. Pierwszy warunek dotyczy dynamicznego zachowania bijaka w momencie osiągnięcia maksymalnego przyspieszenia. Występuje ono, gdy opakowanie osiąga zerową prędkość i następuje w tym momencie natychmiastowe odbicie. Wyznaczając równanie na maksymalne przyspieszenia z równania (5) i pamiętając o warunku, można otrzymać równanie [Wang *et al.* 2005]:

$$\ddot{x}_{\max} = g \sqrt{\frac{2 \frac{\sigma_{\max_acc}}{\varepsilon_{\max_acc}} \left(\frac{h}{d}\right)}{\frac{W}{A}}} e^{-\frac{\zeta \left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (6)$$

gdzie ϕ wyrażony jest wzorem [Wang *et al.* 2005]:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (7)$$

gdzie:

σ_{\max_acc} – naprężenia występujące przy maksymalnym przyspieszeniu,

ε_{\max_acc} – odkształcenie względne występujące przy maksymalnym przyspieszeniu.

Drugi warunek dotyczy zabsorbowanej energii podczas maksymalnego przyspieszenia. W tym momencie cała energia kinetyczna jest przekształcona na energię powodującą deformację materiału przeciwwstrząsowego, jak również na tę, która została roz-

proszona przez jego właściwości tłumiące. Zależność tę można zapisać następującym wzorem [Wang *et al.* 2005]:

$$\frac{1}{2}M\dot{x}^2 = \int_0^{x_{\max_acc}} K(x)dx + E_d \quad (8)$$

gdzie:

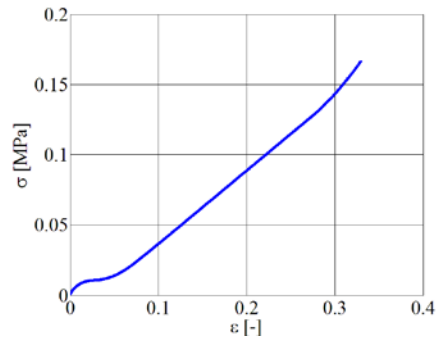
E_d – rozproszona energia przez tłumienie,

x_{\max_acc} – ugięcie sprężyny uzyskane przy maksymalnym przyspieszeniu.

E_d to rozproszona energia przez tłumienie. Korzystając z równań (3) i (8), otrzymujemy zależność [Wang *et al.* 2005]:

$$\int_0^{\varepsilon_{\max_acc}} \sigma \times d\varepsilon = \frac{Wh}{Ad} - \frac{E_d}{Ad} \quad (9)$$

Lewa strona równania (9) opisuje energię zgromadzoną przez materiał przeciw-wstrząsowy aż do otrzymania maksymalnego przyspieszenia masy M . Kumulację tę odczytuje się z wykresu energii w funkcji odkształcenia względnego, który jest tworzony z wykresu naprężenia ściskającego w funkcji odkształcenia względnego, na podstawie wyników z badań doświadczalnych. Przykładowy wykres naprężenia ściskającego w funkcji odkształcenia względnego przedstawiono na rysunku 5.



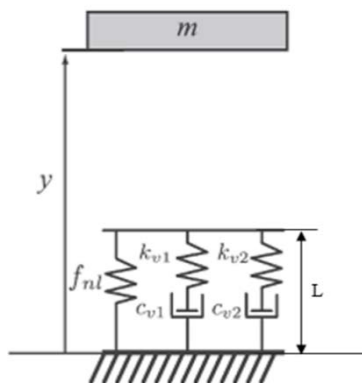
Rys. 5. Wykres naprężenia ściskającego w funkcji odkształcenia względnego [opracowanie własne]

3. NIESPREŻYSTY MODEL ZDERZENIA GIBERTA-BATTA

Model przedstawiony na rysunku 6 opiera się na metodzie badań podanej w normie ASTM D1596. Model ten ma kilka założeń uproszczających:

- bezwładność pianki jest pomijana i zamodelowana jako sprężyna z tłumikiem,
- straty tarcia pomiędzy bijakiem a prowadnicą są pomijane,
- materiał przeciw-wstrząsowy deformuje się tylko w momencie zderzenia; efekt relaksacji może być zauważalny podczas zderzenia; po zdjęciu bijaka materiał przeciw-wstrząsowy powraca do pierwotnej postaci,

- zakłada się, że relaksacja materiału przeciwwstrząsowego w wyniku efektu Mullena (dostrzegalna zmiana krzywej naprężenia w funkcji odkształcenia względnego poddanego wcześniej obciążeniu) jest minimalna.



Rys. 6. Model swobodnego spadku przy wykorzystaniu oscylatora drgań [Gilbert i Batt 2015]

Model (rys. 6) składa się z masy m reprezentującej bijak, sprężyny o nieliniowej charakterystyce f_{nl} oraz sprężyn liniowych k_{vi} i tłumików c_{vi} o ustawieniu szeregowym. Nieliniowa sprężyna reprezentuje hiperelastyczne zachowanie materiału przeciwwstrząsowego. Właściwości relaksacyjne przedstawione są za pomocą równań [Gilbert i Batt 2015]:

$$k_{vi} = \frac{E_i A}{L}, \tau_i = \frac{c_{vi}}{k_{vi}} \quad (10)$$

gdzie:

- k_{vi} – sztywność,
- E_i – moduł relaksacji,
- L – grubość materiału przeciwwstrząsowego,
- c_{vi} – współczynnik tłumienia,
- A – powierzchnia kontaktu.

Bijak jest upuszczany z wysokości $h-L$ i na wysokości $y = L$ następuje kontakt oraz inicjacja ściskania materiału przeciwwstrząsowego. Jeżeli materiał zostanie ściśnięty w 100%, to zostaje to potraktowane jako zetknięcie bijaka z podłożem. Chociaż zdarzenie to nie jest realistyczne, jednakże jest potrzebne dla stabilności procesu symulacji modelu. W tym przypadku następuje zmiana kierunku prędkości i jej wartości o współczynnik restytucji podłoża r . Nieliniowe równanie ruchu bijaka przedstawione jest zależnościami [Gilbert i Batt 2015]:

$$\ddot{y} = -g \text{ dla } y(t) > L \quad (11)$$

$$\ddot{y} = -\hat{f}_{nl}(y-L) - \int_0^t \omega_v^2(t-\xi) \dot{y}(\xi) d\xi - g \text{ dla } y(t) \leq L \quad (12)$$

$$\dot{y}(t^+) = -r\dot{y}(t^-) \text{ dla } y(t) = 0 \quad (13)$$

gdzie [Gilbert i Batt 2015]:

$$\hat{f}_{nl}(y-L) = \left(\frac{AL}{my} \right) \sum_{k=1}^K \mu_k \left[\left(\frac{y-L}{L} + 1 \right)^{\delta_k} - 1 \right] \quad (14)$$

$$\omega_v^2(t) = \sum_{i=1}^2 \frac{k_{vi}}{m} e^{-\left(\frac{t}{t_i} \right)} \quad (15)$$

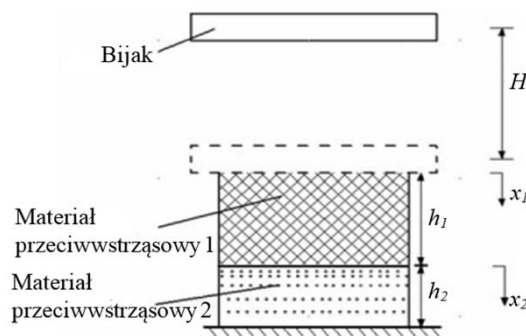
gdzie [Gilbert i Batt 2015]:

f_{nl} – nieliniowa siła sprężyny,
 μ_k, δ_k – parametry materiału,

Warunkami początkowymi modelu są $y(0) = h$ i $\dot{y}(0) = 0$, gdzie h jest wysokością spadku. Należy pamiętać, że układ szeregowy sprężyn z tłumikiem obrazowo opisuje relaksacje materiału i może zostać użyty w symulacji. Równanie (11) reprezentuje swobodny spadek bijaka w trakcie opadania, a (12) – ruch bijaka będącego w kontakcie z materiałem przeciwwstrząsowym. Równanie (13) opisuje ruch bijaka, wtedy gdy materiał przeciwwstrząsowy jest ściśnięty w 100%. Jak wspomniano wcześniej, założenie jest to nierealistyczne, jednakże jest potrzebne dla stabilności procesu symulacji modelu.

4. NIESPRĘŻYSTY MODEL ZDERZENIA LU-TAO-GOA

Model ten bierze pod uwagę dwie warstwy materiałów przeciwwstrząsowych (rys. 7), na które spada bijak o masie m spada z wysokości H .



Rys. 7. Model swobodnego spadku przy dwóch materiałach przeciwwstrząsowych wykonanych z różnych materiałów [Lu *et al.* 2013]

Konstrytuwną relacją opisującą jednoosiowe ściskanie jest funkcja naprężenia dla dwóch rodzajów materiałów przeciwwstrząsowych [Lu *et al.* 2013]:

$$\sigma = f_1(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \text{ i } \sigma = f_2(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \quad (16)$$

Należy zauważyć, że powyższy wzór nie opisuje zachowania materiałów przeciwwstrząsowych podczas ich odciążania oraz odbicia. Zgodnie z drugim prawem Newtona, równanie ruchu bijaka opisane jest jako [Lu *et al.* 2013]:

$$m\ddot{x}_1 + Af_1\left(\frac{x_1 - x_2}{h_1}, \frac{\dot{x}_1 - \dot{x}_2}{h_1}\right) = 0 \quad (17)$$

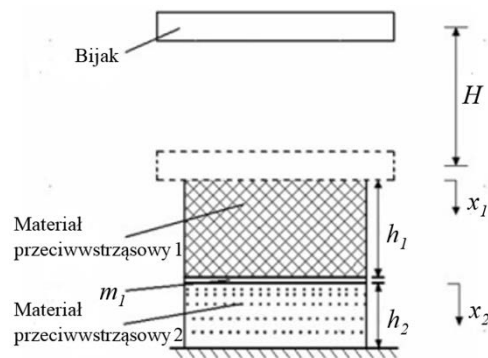
gdzie [Lu *et al.* 2013]:

- x_1 i x_2 – przemieszczenia bijaka i przemieszczenie poszczególnych materiałów przeciwwstrząsowych,
- A – powierzchnia kontaktu materiałów przeciwwstrząsowych,
- h_1 i h_2 – grubości materiałów przeciwwstrząsowych.

Ze względu na to, że masy dwóch warstw materiałów przeciwwstrząsowych są znikome w porównaniu z masą bijaka, siła oporu pierwszego materiału przeciwwstrząsowego jest taka sama jak z drugiego, a mianowicie [Lu *et al.* 2013]:

$$f_1\left(\frac{x_1 - x_2}{h_1}, \frac{\dot{x}_1 - \dot{x}_2}{h_1}\right) - f_2\left(\frac{x_2}{h_2}, \frac{\dot{x}_2}{h_2}\right) = 0 \quad (18)$$

W celu uzyskania dynamicznej reakcji z równań (17) i (18) wstawiana jest wirtualna masa pomiędzy materiałami przeciwwstrząsowymi (przedstawiono na rys. 8) w celu przekształcenia równania (18) w równanie różniczkowe.



Rys. 8. Model swobodnego spadku przy dwóch materiałach przeciwwstrząsowych wykonanych z różnych materiałów po dodaniu wirtualnej masy m_1 [Lu *et al.* 2013]

Dzięki równaniu w takiej postaci można zastosować metodę Runge-Kutta do uzyskania równania ruchu bijaka oraz materiałów przeciwwstrząsowych. Zmienne równania ruchu są następujące [Lu *et al.* 2013]:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + A\left(\frac{x_1 - x_2}{h_1}, \frac{\dot{x}_1 - \dot{x}_2}{h_1}\right) = 0 \\ m_1\ddot{x}_2 - A\left(\frac{x_1 - x_2}{h_1}, \frac{\dot{x}_1 - \dot{x}_2}{h_1}\right) + Af_2\left(\frac{x_2}{h_2}, \frac{\dot{x}_2}{h_2}\right) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

Konstrytuwna relacja między wzorami (16) jest wysoce nieliniowa dla typowych materiałów przeciwwstrząsowych. Naprężenia te w rzeczywistości zależą od dwóch czynników: jeden z nich to odkształcenie sprężyste i plastyczne, a drugi to szybkość odkształcenia. Ta ostatnia wywołuje rozpraszanie energii. Dla ułatwienia, zaniedbujemy drugą część i zakładamy, że równanie zależy tylko od odkształcenia [Lu *et al.* 2013]:

$$\sigma = f_1(\varepsilon) \text{ i } \sigma = f_2(\varepsilon) \quad (20)$$

Stosując metodę linearyzacji odcinkowej, naprężenie w funkcji odkształcenia można wyrazić dla dwóch materiałów przeciwwstrząsowych [Lu *et al.* 2013]:

$$f_1(\varepsilon) = \begin{cases} a_1\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_1 \\ a_2\varepsilon + (a_1 - a_2)\varepsilon_1, & \varepsilon_1 < \varepsilon \leq \varepsilon_2 \\ \dots \\ a_n\varepsilon + \sum_{i=2}^n (a_{i-1} - a_i)\varepsilon_{i-1} & \varepsilon > \varepsilon_{n-1} \end{cases} \quad (21)$$

$$f_2(\varepsilon) = \begin{cases} b_1\varepsilon, & \varepsilon \leq \gamma_1 \\ b_2\varepsilon + (b_1 - b_2)\gamma_1, & \gamma_1 < \varepsilon \leq \gamma_2 \\ \dots \\ b_k\varepsilon + \sum_{i=2}^k (b_{i-1} - b_i)\gamma_{i-1} & \varepsilon > \gamma_{k-1} \end{cases} \quad (22)$$

gdzie ε jest odkształceniem i ε_i ($i = 1, 2, \dots, n$) i γ_i ($i = 1, 2, \dots, k$) są to punkty graniczne funkcji odcinkowych (21) i (22). Aby te funkcje odzwierciedlały relacje, potrzebują wystarczająco dużej liczby punktów, aby zbliżenie odcinków było dokładne. Bez utraty ogółu, zakładamy, że pierwszy materiał przeciwwstrząsowy mieści się w przedziale n -tego odcinka, a drugi materiał przeciwwstrząsowy w zasięgu k -tego odcinka. Wtedy równanie ruchu wynosi [Lu *et al.* 2013]:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + \frac{a_n A}{h_1} x_1 - \frac{a_n A}{h_1} x_2 = A_1 \\ m_1\ddot{x}_2 - \frac{a_n A}{h_1} x_1 + A\left(\frac{a_n}{h_1} + \frac{b_k}{h_2}\right)x_2 = B_1 - A_1 \end{cases} \quad (23)$$

gdzie A_i i B_i wyznaczamy z [Lu *et al.* 2013]:

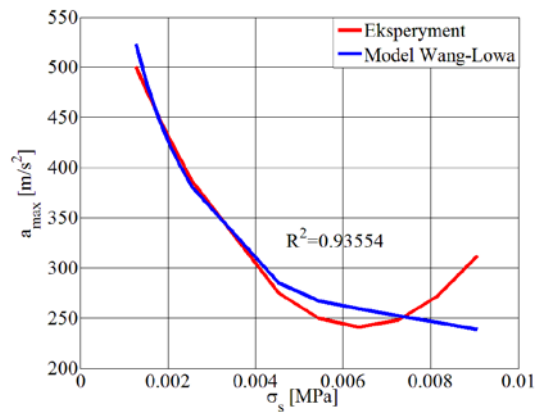
$$A_1 = \begin{cases} 0 & n = 1 \\ -A \sum_{i=2}^N (a_{n-1} - a_n) \varepsilon_{n-1}, & n > 1 \end{cases} \quad (24a)$$

$$B_1 = \begin{cases} 0 & k = 1 \\ -A \sum_{i=2}^K (b_{k-1} - b_k) \varepsilon_{n-1}, & k > 1 \end{cases} \quad (24b)$$

5. WYNIKI Z MODELU ZDERZENIA WANG-LOWA

Omówiony został tylko model Wang-Lowa, gdyż pozostałe modele wymagają więcej niż jednego parametru, który opisuje mechaniczne właściwości materiału przeciwwstrząsowego. Metody ich wyznaczenia nie zostały szczegółowo opisane lub wymagały kosztownej aparatury. Na rysunku 9 przedstawiono wykresy krzywej amortyzacji, wyznaczone na podstawie eksperymentu i z modelu Wang-Lowa. Podczas badań przyjęto, że wysokość swobodnego spadku materiału przeciwwstrząsowego wynosi $h = 184$ mm, materiał przeciwwstrząsowy ma grubość $d = 42$ mm i powierzchnię $A = 196 \times 196$ mm. Model Wang-Lowa wymaga współczynnika tłumienia ζ dla materiału przeciwwstrząsowego. W celu wyznaczenia tego parametru zastosowano algorytm British Museum, którego wartość wynosi 0,1.

Z analizy rysunku 9 wynika, że krzywa wyznaczona na podstawie modelu została dobrze dopasowana do danych eksperymentalnych – współczynnik determinacji $R^2 = 0,93554$. Lecz charakter wykresu podczas przeciążenia materiału przeciwwstrząsowego nie został odzwierciedlony w modelu tak jak podczas badań doświadczalnych (po przekroczeniu obciążenia statycznego 0,006 MPa).



Rys. 9. Krzywa amortyzacji uzyskana z eksperymentu i modelu Wang-Lowa [opracowanie własne]

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono współczesne modele zderzeń ciał niesprężystych oraz wykonano weryfikację eksperymentalną dla jednego z tych modeli. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że przy stosowaniu modelu Wang-Lowa występują trudności w wyznaczaniu krzywej amortyzacji w momencie przeciążania materiału. Między wynikami symulacji a eksperymentalnymi zderzenia (przy swobodnym spadku bijaka na próbkę materiału przeciwwstrząsowego poddanego różnym obciążeniom statycznym) występuje rozbieżność, gdy pojawia się intensywne zagęszczanie materiału podczas ściskania. Brak pełnej satysfakcji z wyznaczania krzywej amortyzacji z zastosowaniem symulacji numerycznej zderzenia powoduje potrzebę kontynuacji dalszych badań w poszukiwaniu bardziej skutecznych modeli zderzeń.

LITERATURA

- ASTM D1596-97, 2011. Standard Test Method for Dynamic Shock Cushioning Characteristics of Packaging Material.
- Gibert J., Batt G., 2015. Impact Oscillator Model for the Prediction of Dynamic Cushion Curves of Open Cell Foams. *Packag. Technol. Sci.*, 28, 227-239.
- Gilardi G., Sharf I., 2002. Literature survey of contact dynamic modelling. *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier, 37, 1213-1239.
- Kirkpatrick J., 2013. *Corrugated Cushion Design Handbook. A Handbook for the Effective Use of Corrugated Fibreboard as a Cushioning Medium in Protective Packaging.* Victoria University, Melbourne Australia, Melbourne, Australia, www.staff.vu.edu.au/sek/Handbook%20corrugated%20part%201.pdf (data pobrania: 2013-11-28).
- Lu F., Tao W., Gao D., 2013. Virtual Mass Method for Solution of Dynamic Response of Composite Cushion Packaging System. *Packag. Technol. Sci.*, 36, 32-42.
- PN-O-79003:1988P. Opakowania – Rodzaje badań – Terminologia.
- Yam K.L., 2009. *Encyclopedia of packaging technology.* A John Wiley & Sons.
- Wang Y., Low K.H., Gao D., 2005. Damped response analysis of nonlinear cushion systems by a linearization method. *Computers and Structures*, 83, 1584-1594.