

**AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**Mgr inż. Przemysław Osowski**

**Badania teoretyczne i doświadczalne wybranych  
materiałów w procesie konstruowania opakowań  
narażonych na obciążenia spowodowane zderzeniem**

**Promotor**

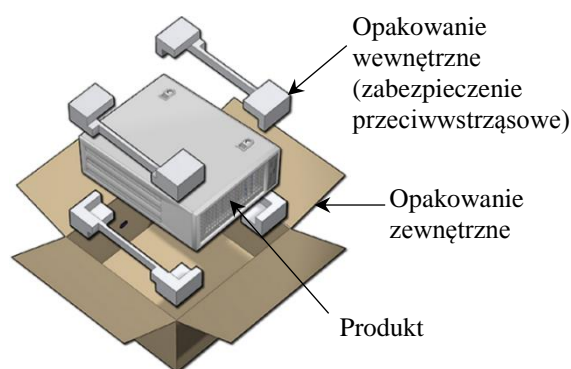
**Dr hab. inż. Tomasz Piątkowski, prof. nadzw. UTP**

## 1. Uzasadnienie wyboru tematu

Opakowania odgrywają ważną rolę w gospodarce każdego kraju, a przemysł opakowaniowy zajmuje znaczące miejsce wśród dziedzin produkcji. Jednym z ważniejszych zadań opakowań jest ochrona zawartego w nim produktu przed szkodliwych wpływem oddziaływań pojawiających się w procesie przeładunkowo-transportowym, np.:

- obciążeń mechanicznych (naciski, uderzenia, wstrząsy),
- zmian temperatury i wilgoci,

W celu ochrony produktu przed uszkodzeniem spowodowanym uderzeniem mechanicznym stosowane są opakowania transportowe (rys.1), które składają się z pudła tekturowego (opakowania zewnętrznego) oraz zabezpieczenia przeciwwstrząsowego. Funkcje przeciwwstrząsowe pełni materiał lub wkładka wprowadzona do opakowania, która redukuje wpływ wstrząsów wywołanych podczas manipulowania i transportu.



Rys.1. Przykładowa budowa opakowania transportowego.

## 2. Cel rozprawy

Podstawowym celem pracy jest opracowanie oryginalnej metody pozwalającej wyznaczyć właściwości przeciwwstrząsowe materiałów amortyzujących skutki zderzenia stosowanych, jako zabezpieczenia przeciwwstrząsowe, przy możliwie jak najmniejszym udziale badań eksperymentalnych wspartych obliczeniami analitycznymi i numerycznymi.

Obecnie powszechną metodą projektowania opakowań jest metoda prób i błędów posiłkująca się zbiorami krzywych amortyzacji materiałów przeciwwstrząsowych i badaniami eksperymentalnymi (zgodnymi z normą PN-EN 22248:2001), weryfikującymi zdolności łagodzenia skutków zderzenia prototypów.

Projektowanie opakowań metodą prób i błędów sprowadza się do żmudnego, czasochłonnego i kosztownego powtarzania sekwencji: budowa prototypu, weryfikacja eksperymentalna i modyfikacja, aż do uzyskania założonego poziomu łagodzenia skutków zderzenia. Dedykowane dla tej metody zbiory krzywych amortyzacji nie nadają się do bezpośredniego zastosowania w modelach analitycznych zderzeniach ciał niesprężystych, ani w modelach numerycznych opartych na metodzie elementów skończonych (MES). We współczesnych środowiskach modelowania MES, jednym z podstawowych parametrów modeli materiałów przeciwwstrząsowych stosowanych do opisu procesu zderzenia są krzywe naprężenie-odkształcenie. Krzywe te wyznaczone są na maszynach wytrzymałościowych, przy stałej i niewielkiej prędkości ściskania (w porównaniu z prędkościami zderzenia uzyskiwanymi w warunkach rzeczywistych). Uzyskane krzywe pozbawione są wpływu efektów dynamicznych występujących w realnym procesie zderzenia, co powoduje brak satysfakcjonujących wyników analiz

MES i zniechęcenie do stosowania tej metody w projektowaniu wypełnień opakowań. Lepszym rozwiązaniem powinno być zastosowanie krzywych dynamicznego ściskania, uzyskanych na podstawie eksperymentalnych badań zderzenia wg procedur adoptowanych z normy ASTM D-1596-97 (2011). Krzywe te nie są jednak udostępniane przez producentów materiałów przeciwwstrząsowych, ani w literaturze przedmiotu – stąd potrzeba opracowania własnej metody ich wyznaczenia.

### **3. Hipotezy rozprawy**

- Oczekiwane właściwości mechaniczne struktur przeciwwzderzeniowych opakowań można kształtować w procesie projektowania wspomaganym komputerowo, stosując krzywe dynamicznego ściskania materiałów konstrukcyjnych, wyznaczone metodą energetyczną na podstawie prób swobodnego spadku.
- Krzywą dynamicznego ściskania, stanowiącą główną charakterystykę mechaniczną materiału opakowaniowego piankowego o zamkniętych komórkach, można wyznaczyć wykorzystując krzywe amortyzacji lub na podstawie prób swobodnego spadku.

### **4. Przedstawienie zakresu pracy**

Rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów. W pierwszym rozdziale dokonano analizy aktualnego stanu wiedzy w zakresie identyfikowania narażeń mechanicznych o charakterze udaru. Dokonano ogólnej charakterystyki opakowań i ich zastosowań. Omówiono również tradycyjny sposób projektowania opakowań oraz wybrane modele zderzeń stosowane w numerycznych metodach obliczeniowych. W drugim rozdziale zawarto cel i hipotezę badawczą. W trzecim rozdziale opisano oryginalną metodę wyznaczenia krzywej dynamicznego ściskania. W rozdziale czwartym omówiono program badań wyznaczenia krzywej dynamicznego ściskania oraz weryfikację zaprojektowanego testera zderzeń. Przedstawiono również wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych, przeprowadzonych z wykorzystaniem testera zderzeń dla pianki polietylenowej oraz tektury 3-warstwowej. Zestawiono także wyniki z badań eksperymentalnych i numerycznych przeprowadzonych dla opakowania testowego. W rozdziale piątym badany jest wpływ kąta pochylenia ściany bocznej materiału przeciwwstrząsowego, o przekroju trapezowym, na efektywność łagodzenia skutków zderzenia. W rozdziale szóstym zawarto podsumowanie i wnioski końcowe.

### **5. Analiza stanu wiedzy**

Współczesne modele zderzeń można podzielić na dwie zasadnicze grupy: modele dyskretne i ciągłe. W modelach dyskretnych przyjmuje się, że zderzenie odbywa się w nieskończenie krótkim czasie (bezczasowo), a miarą rozproszenia energii układu jest współczynnik restytucji. Modele te pozwalają wyznaczyć prędkości ruchu ciał po zderzeniu, ale bez możliwości określenia ich przyspieszeń i odkształceń. Wady tej pozbawione są modele ciągłe. W tej grupie wyodrębnić można modele lokalne (opisujące odkształcenia skoncentrowane w pobliżu miejsca kontaktu) i falowe (definiujące odkształcenia pojawiające się w całej objętości ciał).

Do analizy zjawiska zderzenia opakowań transportowych wybrano model ciągły, uwzględniający odkształcenia lokalne. Model ten dedykowany jest dla ciał o zwartej budowie, tj. o wymiarach w trzech kierunkach takiego samego rzędu, jak np. rozpatrywanych w pracy opakowaniach transportowych, w których energia rozpraszana przez efekty falowe nie przekracza 4%.

Do opisu materiału pianki polietylenowej oraz tektury 3-warstwowej wykorzystano model pianki hiperelastycznej Ogdena-Storakersa, który opisuje gęstość energii następującym wzorem:

$$E_d = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left( \lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 \right) + \frac{1}{\beta_i} \left( J^{-\alpha_i \beta_i} - 1 \right) \quad (1)$$

gdzie :

$N$  – liczba parametrów materiałowych,

$\mu_i$ ,  $\alpha_i$  i  $\beta_i$  – parametry materiału,

$\lambda_i$  – wydłużenie wzdłuż osi głównej,

$J$  – jacobian gradientu deformacji  $J = \det(F_{ij})$ .

Powyższy model wykorzystano także do opisu zachowania tektury falistej. Własne badania eksperymentalne wykazały, że model ten pozwala poprawnie wyznaczyć maksymalne wartości przyspieszeń podczas zderzenia również w przypadku tego materiału.

Łącznie w pracy ujęto 123 pozycji literaturowych, głównie anglojęzycznych z okresu ostatnich dziesięciu lat.

## 6. Zakres badań własnych

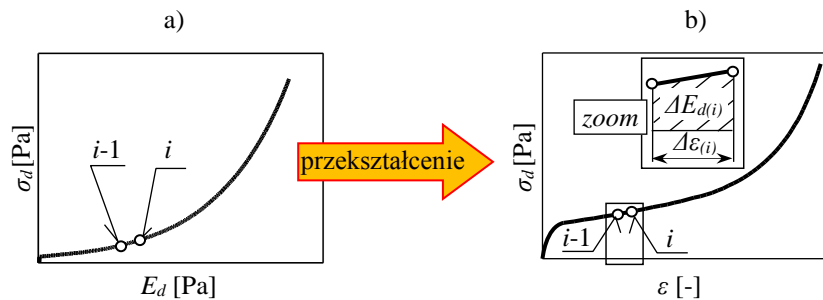
Do zrealizowania celu rozprawy oraz wykazania słuszności postawionych hipotez przeprowadzono szczegółową analizę stanu wiedzy na podstawie dostępnej literatury oraz badań własnych. Zakres badań własnych obejmuje:

- opracowanie oryginalnej procedury wyznaczania krzywych dynamicznego ściskania materiałów przeciwwstrząsowych na podstawie krzywych amortyzacji lub badań eksperymentalnych,
- zaprojektowanie i wykonanie prototypu stanowiska badawczego do realizacji testów zderzeniowych,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych na stanowisku badawczym dla materiałów przeciwwstrząsowych (pianki o zamkniętych komórkach i tektury falistej) oraz przykładowo skonfigurowanych na ich bazie struktur przeciwwzderzeniowych opakowań,
- wyznaczenie krzywych dynamicznego ściskania dla wybranych materiałów przeciwwstrząsowych,
- opracowanie modeli numerycznych odtwarzających przebieg przeprowadzonych badań eksperymentalnych zderzenia bijaka z próbką oraz testowego opakowania ze sztywnym podłożem,
- weryfikację wyników symulacji modeli numerycznych na podstawie wyników badań eksperymentalnych.

## 7. Procedura wyznaczania krzywej dynamicznego ściskania

Zgodnie z przyjętą hipotezą opracowano oryginalną procedurę do wyznaczania krzywych dynamicznego ściskania materiałów przeciwwstrząsowych na podstawie krzywych amortyzacji lub badań eksperymentalnych.

Procedura ta składają się z dwóch etapów: 1 – opracowanie wykresu dynamicznego ściskania w funkcji gęstości energii połączone z aproksymacją danych krzywą b-sklejaną trzeciego stopnia (rys.2a), 2 – wyznaczenie krzywej dynamicznego ściskania w funkcji odkształcenia (rys.2b).



Rys.2. Etapy wyznaczania krzywej dynamicznego ściskania w funkcji odkształcenia: a) krzywa dynamicznego ściskania w funkcji gęstości energii, b) krzywa dynamicznego ściskania w funkcji odkształcenia;  $i=1,2,3\dots n$  – indeks punktu na wykresie,  $n$  – indeks ostatniego punktu na wykresie,  $\Delta E_d(i) = E_d(i) - E_d(i-1)$  –  $i$ -ty przyrost gęstości energii.

W etapie wyznaczania wykresu  $\sigma_d(E_d)$  (rys.2a) opracowano dwie metody pozyskiwania danych: na podstawie zbioru krzywych amortyzacji oraz własnych badań eksperymentalnych.

W pierwszej metodzie, dane do wykresu  $\sigma_d(E_d)$  dostarczane są ze zbioru krzywych amortyzacji, udostępnianych niekiedy przez dostawców materiałów przeciwwstrząsowych (rys.3a). Pobieranie punktów z krzywych jest tak określone, aby równomiernie wypełnić przyjęty zakres energii pochłanianej przez materiał przeciwwstrząsowy:  $E_d \in \langle E_{d \min}, E_{d \max} \rangle$ . Gęstość energii wyznaczana jest z zależności:

$$E_d = \sigma_s \frac{h}{d} \quad (2)$$

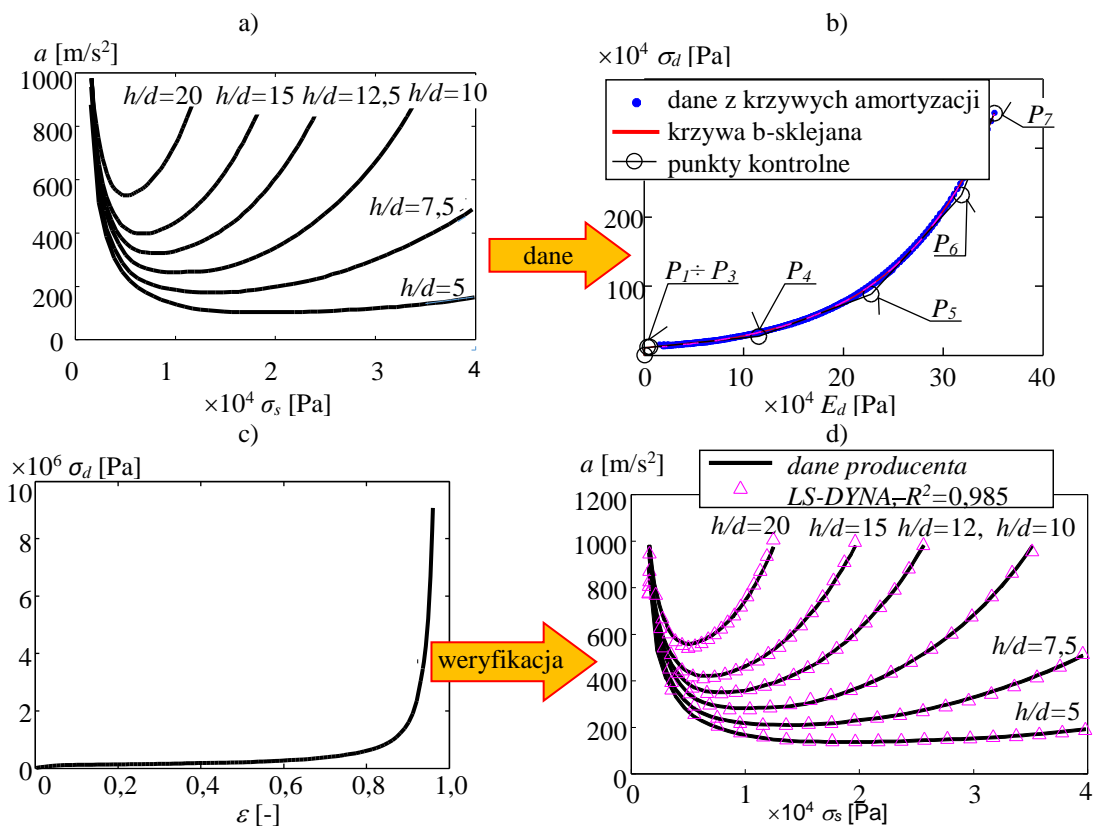
gdzie:

- $\sigma_s$  – statyczny nacisk powierzchniowy produktu na materiał przeciwwstrząsowy,
- $h$  – wysokość swobodnego spadku bijaka,
- $d$  – grubość badanej próbki.

Dla zadanych parametrów  $\sigma_s$ ,  $h$  i  $d$ , z krzywej o stosunku  $h/d$ , odczytywana jest wartość przeciążenia  $G$  (wielokrotność przyspieszenia ziemskiego), dzięki której wyznaczane jest naprężenie dynamiczne:

$$\sigma_d = \sigma_s G \quad (3)$$

Wyniki badań zastosowania tej procedury (rys.3) zostały przedstawione w pracy T. Piątkowski, P. Osowski, pt.: „Modified Method for Dynamic Stress-Strain Curve Determination of Closed-Cell Foams” opublikowanej w Packaging Technology and Science, wydawnictwa John Wiley & Sons. Podczas tych badań wyznaczono krzywą dynamicznego ściskania w funkcji odkształcenia (wykorzystując zbiór krzywych amortyzacji, rys.3a), a następnie posługując się tą krzywą (rys.3c) i modelem zderzenia opracowanym w środowisku LS-DYNA, odtworzono źródłowe krzywe amortyzacji, uzyskując je z dużą dokładnością (rys.3d,  $R^2=0,985$ ). Powyższa metoda powinna być stosowana wtedy, gdy dostawcy materiałów przeciwwstrząsowych udostępniają charakterystyki swoich produktów w postaci zbioru krzywych amortyzacji.



Rys.3. Schemat weryfikacji procedury wyznaczania krzywej dynamicznego ściskania materiału przeciwwstrząsowego na podstawie krzywych amortyzacji: a) krzywe amortyzacji udostępnione przez producentów, b) krzywa dynamicznego ściskania w funkcji gęstości energii, c) krzywa dynamicznego ściskania w funkcji odkształcenia, d) rekonstrukcja krzywych amortyzacji na podstawie symulacji zderzenia bijaka z próbką, wykorzystując model zderzenia opracowany w środowisku LS-DYNA.

Druga metoda pozyskania danych do wykresu  $\sigma_d(E_d)$  (rys.2a) polega na wykorzystaniu przebiegów przyspieszeń w funkcji czasu, wyznaczonych na testerze zderzeń. Procedura ta ma zastosowanie wtedy, gdy dostawcy nie udostępniają żadnych charakterystyk dla oferowanych materiałów przeciwwstrząsowych – co bardzo często się zdarza.

Gęstość energii zderzenia wyznaczana jest na podstawie energii potencjalnej bijaka testera zderzeń, osiągniętej podczas badań oraz objętość badanej próbki:

$$E_d = \frac{mgh}{Ad} \quad (4)$$

gdzie:

- $m$  – masa bijaka,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie,
- $h$  – wysokość swobodnego spadku,
- $A$  – pole powierzchni kontaktowej prostokątnej próbki z bijakiem,
- $d$  – grubość badanej próbki.

Dla danej wartości gęstości energii wyznaczane jest naprężenie dynamiczne poprzez zastosowanie wzoru:

$$\sigma_d = \frac{ma_{\max}}{A} \quad (5)$$

gdzie:

$a_{\max}$  – maksymalne przyspieszenie bijaka uzyskane podczas testu zderzenia.

Dynamiczne naprężenie w funkcji czasu można także wyznaczyć korzystając z przebiegów przyspieszeń bijaka zarejestrowanych podczas badań eksperymentalnych zderzenia:

$$\sigma_d(t) = \frac{ma(t)}{A} \quad (6)$$

gdzie:

$a(t)$  – przebieg przyspieszenia w funkcji czasu uzyskany na podstawie badań eksperymentalnych.

Całkując dwukrotnie przebiegi przyspieszeń (uzyskane z badań eksperymentalnych) otrzymujemy przebiegi przemieszczeń bijaka podczas zderzenia, opisujące ugięcie próbki. Posługując się uzyskanymi przebiegami przemieszczeń oraz grubością próbki  $d$  wyznaczamy odkształcenie próbki za pomocą wzoru:

$$\varepsilon(t) = \frac{x(t)}{d} \quad (7)$$

gdzie:

$x(t)$  – ugięcie próbki,

$d$  – grubość próbki.

Na podstawie równań (6) i (7) można wyznaczyć funkcję  $\sigma_d(\varepsilon)$ . Całkując tę funkcję uzyskujemy gęstość energii dla poszczególnych przebiegów przyspieszeń,:

$$E_d(\varepsilon) = \int \sigma_d(\varepsilon) d\varepsilon \quad (8)$$

Dane do wykresu  $\sigma_d(\varepsilon)$  wyznaczamy wg następującego schematu:

- przyjęcie zakresu gęstości energii  $E_d \in \langle E_{d \min}, E_{d \max} \rangle$ , który zastosowany będzie podczas badań eksperymentalnych materiału przeciwwstrząsowego, realizowanych na testerze zderzeń,
- podział przyjętego zakresu gęstości energii  $E_d$  na równomiernie rozmieszczone wartości  $E_{d(j)}$  (np. na dziewięć wartości, wtedy  $j=1,2,3 \dots 9$ , ponadto  $E_{d(1)} = E_{d \min}$ ,  $E_{d(9)} = E_{d \max}$ ),
- wykonanie badań eksperymentalnych na testerze zderzeń dla każdej wartości  $E_{d(j)}$ ,
- naniesienie punktów na wykres  $\sigma_d(\varepsilon)$ , wykorzystując maksymalne zarejestrowane przyspieszenia uzyskane dla zadanych wartości  $E_{d(j)}$ , stosując równania (4) i (5),
- wypełnienie początkowego zakresu wykresu  $\sigma_d(E_d)$  danymi z przedziału  $E_d \in \langle 0; E_{d \min} \rangle$  stosując równania (6), (7) oraz (8) i uwzględniając tylko etap ściskania próbki zarejestrowany podczas zderzenia.

Następnie, uzyskane dane z wykresu  $\sigma_d(E_d)$  (pozyskane wg dowolnego wariantu metody) należy poddać aproksymacji drogą optymalizacji numerycznej, np. krzywą b-sklejaną trzeciego stopnia.

W zadaniu optymalizacji wykorzystano metodę gradientową SQP z funkcją celu reprezentowaną równaniem:

$$\min Q(X) = \min \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (9)$$

gdzie:

$X = [y_2, y_3, \dots, y_{n_p}]$  - zmienne decyzyjne,

$n_p$  - liczba punktów kontrolnych krzywej b-sklejanej,

$\hat{y}_i, y_i$  -  $i$ -ta współrzędna krzywej naprężenia dynamicznego w funkcji gęstości energii wyznaczona odpowiednio na podstawie krzywej b-sklejanej i badań doświadczalnych.

Całkowity przebieg krzywej  $\sigma_d = f(E_d)$  definiowany jest za pomocą  $n_p = 8$  punktów kontrolnych (rys.4), z których 7 współrzędnych są zmiennymi decyzyjnymi, a pozostałe 9 mają stałe wartości:

$$x_1 = 0, y_1 = 0, x_2 = 0.01x_5, x_3 = 0.2x_5, x_4 = 0.5x_5, x_5 = \frac{E_d \max}{n_p - 4}, \quad (10)$$

$$x_i = x_{i-1} + temp, \text{ gdzie } i=6,7,\dots,n_p$$

gdzie:

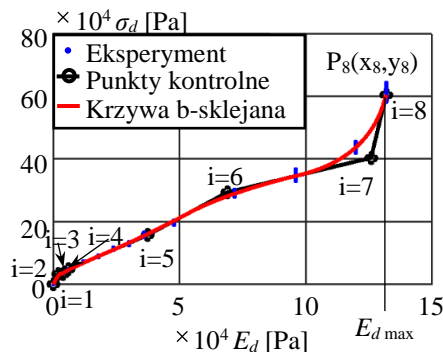
$$temp = \frac{E_d \max - x_5}{n_p - 5} \quad (11)$$

Przyjęto następujące ograniczenie liniowe zadania optymalizacji:

$$y_i - y_{i-1} < 0 \text{ gdzie } i = 2,3,\dots,n_p \quad (12)$$

Ostatnim etapem jest przekształcenie krzywej  $\sigma_d = f(E_d)$  do krzywej  $\sigma_d = f(\varepsilon)$ . Wykorzystywana jest właściwość, wg której pole pod krzywą  $\sigma_d = f(\varepsilon)$  jest równe gęstości energii (powiększony szczegół na rys.2b):

$$E_d = \int \sigma_d \times d\varepsilon \quad (13)$$



Rys.4. Schemat krzywej b-sklejanej;  $P$  - punkty kontrolne,  $i=1,2,3,\dots,8$  - indeks punktów kontrolnych,  $E_d \max$  - maksymalna gęstość energii przyjęta podczas prób zderzeń.

Stosując metodę trapezów do numerycznego całkowania krzywej  $\sigma_d = f(\varepsilon)$ , odkształcenie  $\varepsilon$  (oś odciętych na wykresie rys.2b) można wyznaczyć wg zależności:



$$\varepsilon_{(i)} = \sum_{k=1}^i \Delta \varepsilon_k \quad (14)$$

gdzie:

$\Delta \varepsilon_{(i)}$  –  $i$ -ty przyrost odkształcenia względnego.

$$\Delta \varepsilon_{(i)} = \begin{cases} \frac{2(E_{d(i)} - E_{d(i-1)})}{\sigma_{d(i)} + \sigma_{d(i-1)}} & \text{gdzie } i > 1 \\ 0 & \text{w przeciwnym razie} \end{cases} \quad (15)$$

W celu wykorzystania utworzonej krzywej (w środowiskach numerycznego modelowania zjawiska zderzenia) konieczne jest jej wydłużenie, aby powstające naprężenia lokalne podczas symulacji nie przekroczyły maksymalnego naprężenia wyznaczonego z krzywej. W tym celu ekstrapolowano wykres do naprężenia 200 MPa (wartość porównywalna z granicą plastyczności materiału, który uderza w badaną próbkę). Zastosowano ekstrapolację hiperboliczną stopnia  $n$ , zgodnie z następującym równaniem:

$$\sigma_{d(i+1)} = \sigma_{d(i)} + \left( \frac{\partial \sigma_d}{\partial \varepsilon} \Big|_{\varepsilon_2} \right) \left( \frac{1 - \varepsilon_2}{1 - \varepsilon_i} \right)^n (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad (16)$$

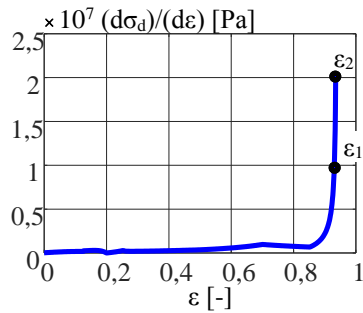
gdzie  $n$  jest zdefiniowane, jako:

$$n = \frac{\ln \left( \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\frac{\partial \sigma_d}{\partial \varepsilon} \Big|_{\varepsilon_2} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \right)}{\ln \left( \frac{1 - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_2} \right)}; \quad \varepsilon_2 > \varepsilon_1 \quad (17)$$

Wartość  $\varepsilon_2$  (rys.5) stanowi odciętą punktu na wykresie pochodnej funkcji  $\sigma_d = f(\varepsilon)$ , w którym krzywa osiąga maksymalną wartość. Wartość  $\varepsilon_1$  odczytujemy z wykresu, znajdując wartość rzędną spełniającą zależność:

$$\frac{d\sigma_d}{d\varepsilon}(\varepsilon_1) = 0,55 \frac{d\sigma_d}{d\varepsilon}(\varepsilon_2) \quad (18)$$

Wartości  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  odczytujemy z wykresu  $\sigma_d = f(\varepsilon)$  korzystając z uprzednio wyznaczonych odkształceń  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$ .

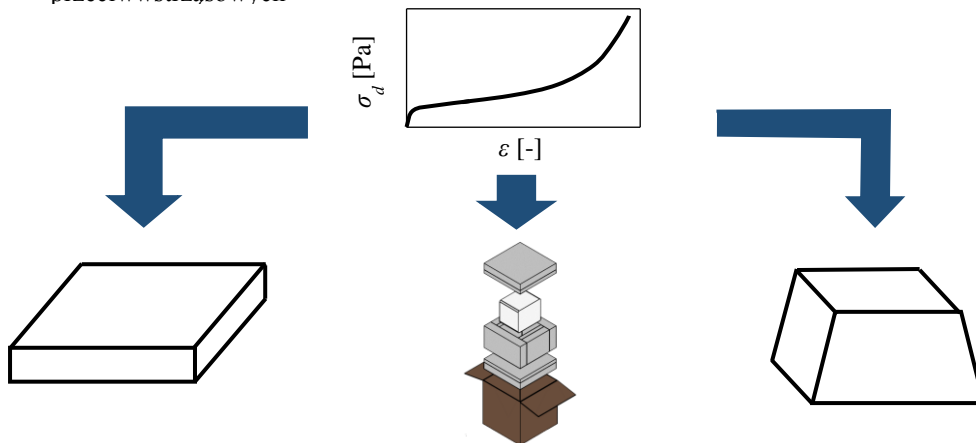


Rys.5. Pochodna krzywej  $\sigma_d = f(\varepsilon)$ .

## 8. Badania numeryczne i eksperymentalne zderzeń

W pracy doktorskiej wykonano badania numeryczne oraz eksperymentalne według schematu przedstawionego na rys.6.

- a) eksperymentalne wyznaczenie krzywych dynamicznego ściskania materiałów przeciwwstrząsowych



- b) weryfikacja wyników badań numerycznych zderzenia bijaka z materiałem przeciwwstrząsowym

- c) weryfikacja numerycznego modelu opakowania testowego podczas testów zderzeń

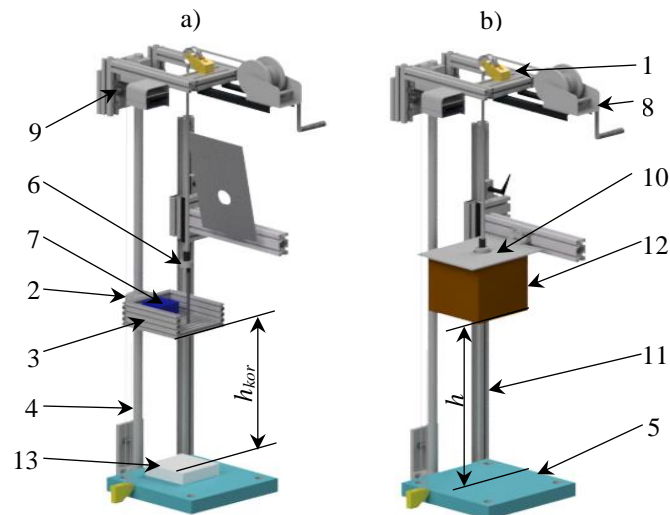
- d) weryfikacja wpływu kąta pochylenia ścian materiału przeciwwstrząsowego o przekroju trapezowym na efektywność łagodzenia skutków zderzenia

Rys.6. Schemat badań eksperymentalnych i numerycznych.

## 9. Wyznaczenie krzywych dynamicznego ściskania dla materiałów przeciwwstrząsowych na podstawie badań eksperymentalnych

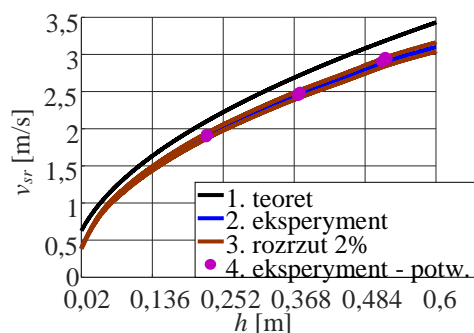
Wykresy dynamicznego ściskania w funkcji odkształcenia pianki polietylenowej STRATLITE 22 o gęstości  $22 \text{ kg/m}^3$  oraz tektury 3-warstwowej o fali B wyznaczono za pomocą testera zderzeń, który pozwala na rejestrację przebiegu przyspieszenia bijaka zderzającego się z próbką podczas testów swobodnego spadku z wysokości (rys.7a). Głównym elementem urządzenia jest bijak (3), który

osadzony jest na łożysku liniowym (2), poruszającym się po prowadnicy (4). Podstawa bijaka ma wymiary 200x200 mm. Do bijaka przymocowano trójosiowy rejestrator przyspieszeń SAVER 3X90 (7), którego celem jest rejestracja przyspieszenia w momencie zderzenia z badaną próbką (13), umieszczoną na podstawie (5). Rozpoczęcie opadania bijaka następuje poprzez rozłączenie elektromagnesu (6).



Rys.7. Tester zderzeń dla: a) materiałów przeciwwstrząsowych, b) opakowań: 1 – korona, 2 – łożysko liniowe, 3 – bijak, 4 – prowadnica testera zderzeń dla materiałów przeciwwstrząsowych, 5 – podstawa, 6 – elektromagnes, 7 – trójosiowy rejestrator przyspieszeń, 8 – wciągarka linowa, 9 – linkowy czujnik przemieszczenia, 10 – płyta pozycjonująca opakowanie, 11 – kolumna płyty pozycjonującej opakowanie, 12 – opakowanie, 13 – próbka.

W związku z pojawiającym się tarciem między łożyskiem liniowym a prowadnicą, wpływającym na ruch bijaka w trakcie opadania z zadanej wysokości, wyznaczono wykres średniej prędkości bijaka w zależności od wysokości swobodnego spadku (Rys.8).



Rys.8. Wykres średniej prędkości liniowej bijaka testera zderzeń w funkcji wysokości swobodnego spadku.

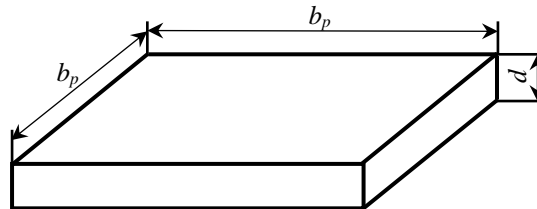
Zgodnie z normą ASTM D-1596-97, prędkości liniowe bijaka uzyskane z zadanej wysokości powinny mieścić się w przedziale 2%, względem średniej wartości prędkości. Jak można zauważyć, wszystkie punkty z badań doświadczalnych mieszczą się we wspomnianym przedziale 2%. Powyższy wykres wykorzystywany jest do ustalenia wysokości skorygowanej  $h_{kor}$  (rys.7a), tak aby w momencie zderzenia uzyskać zadaną prędkość teoretyczną:

$$v_{teor} = \sqrt{2gh} \quad (19)$$

gdzie:

- $g$  – przyspieszenie ziemskie,
- $h$  – wysokość swobodnego spadku.

Badania eksperymentalne wykonano zgodnie z normą ASTM D-1596-97. Według tej normy badana próbka powinna mieć kształt prostopadłościanu o podstawie kwadratowej (rys.9).

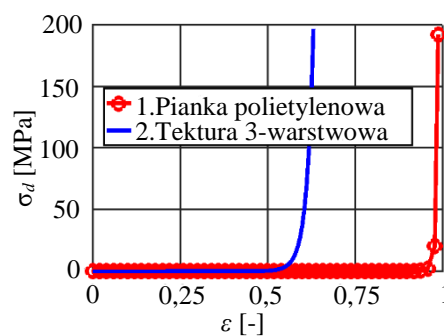


Rys.9. Próbką do badań z podstawowymi wymiarami.

Bok  $b_p$  podstawy próbki nie powinien być większy niż 200 mm, by nie przekroczyć wymiarów podstawy bijaka. Wymiar  $b_p$  także nie powinien być mniejszy niż 101,6 mm, gdyż pojawiające się efekty wyboczenia podczas badania materiału przeciwwstrząsowego wpływałyby na wynik pomiaru. Wymiary  $b_p$  i  $d$  próbek oraz wysokość swobodnego spadku  $h$  dobierano tak, aby podstawiając do wzoru (4) otrzymać zakładaną wartość gęstości energii przy masie bijaka  $m_b = 4,405$  kg.

Podczas badań eksperymentalnych swobodnego spadku, próbka ustawiana jest na środku podstawy testera zderzeń oraz bijak na zadaną wysokość korekcyjną  $h_{kor}$  (wysokość wyznaczoną z rys.8, w celu uzyskania zadanej prędkości zderzenia). Wykonywana jest seria pięciu prób zderzenia bijaka z każdą próbką z minimum 1 minutową przerwą pomiędzy testami. Z piątej próby odczytywany jest przebieg przyspieszenia w funkcji czasu. Dla każdej wartości gęstości energii przyjętej w planie badań, zarejestrowano 16 przebiegów przyspieszeń.

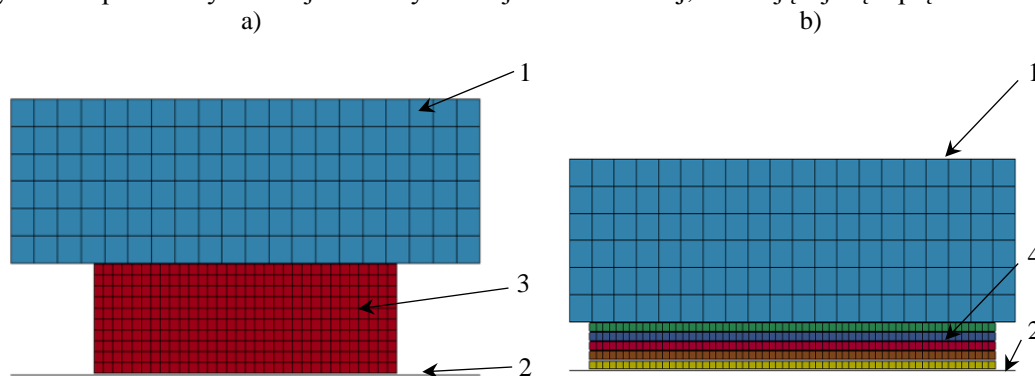
Wykorzystując procedurę przedstawioną w rozdziale 7 wyznaczono (na podstawie przebiegów przyspieszeń) krzywe dynamicznego ściskania dla poszczególnych materiałów przeciwwstrząsowych (rys.10).



Rys.10. Krzywe  $\sigma_d = f(\epsilon)$  pianki polietylenowej STRATLITE 22 oraz tektury falistej 3-warstwowej z falą typu B.

## 10. Weryfikacja eksperymentalna wyników badań numerycznych materiałów przeciwwstrząsowych

Model numeryczny zderzenia bijaka z próbką został opracowany w środowisku LS-DYNA (rys.11). Model przedstawiony na rys.11a dotyczy próbki wykonanej z pianki polietylenowej, a na rys.11b – próbki wykonanej z tektury falistej 3-warstwowej, składającej się z pięciu arkuszy.



Rys.11. Model numeryczny w środowisku LS-DYNA odwzorowujący proces zderzenia bijaka z próbką wykonaną z: a) pianki polietylenowej, b) tektury falistej; 1 – bijak, 2 – sztywne podłoże, 3 – pianka polietylenowa, 4 – tektura falista 3-warstwowa.

W celu ustalenia zgodności przebiegów przyspieszeń oceniono dopasowanie wyników symulacji z eksperymentalnymi poprzez zastosowanie współczynnika determinacji  $R^2$  oraz błędu względnego  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{|\hat{a}_{\max} - a_{\max}|}{a_{\max}} \quad (20)$$

gdzie:

$\hat{a}_{\max}$ ,  $a_{\max}$  – maksymalna wartość przyspieszenia wyznaczona na podstawie wyników symulacji oraz badań doświadczalnych.

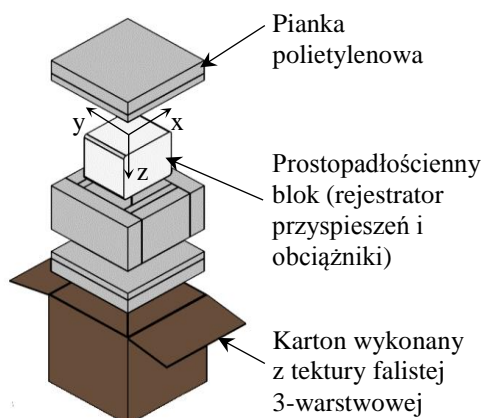
Dla pianki polietylenowej uzyskano zgodność przebiegów przyspieszeń nie mniejszą niż  $R^2 = 0,72$  oraz zgodność wartości maksymalnych przyspieszeń nie mniejszą niż  $\Delta = 4,60\%$ , zaś dla tektury falistej 3-warstwowej -  $R^2 = 0,27$  i  $\Delta = 4,93\%$ . Tektura falista posiada dużą niejednorodność struktury (większą niż w przypadku pianek polietylenowych). W efekcie, osiągnięta wartość współczynnika determinacji jest niska, mimo dobrej zgodności wartości maksymalnych przyspieszeń ( $\Delta < 5\%$ ). Z punktu widzenia ochrony produktu przed uszkodzeniem podczas zderzenia, istotniejsza jest poprawność szacowania maksymalnych przyspieszeń niż kształtu charakterystyki przyspieszenia. Z tego względu, krzywe dynamicznego ściskania materiałów przeciwwstrząsowych, wyznaczone wg własnej metody, można wykorzystać w modelach numerycznych opakowań transportowych.

## 11. Weryfikacja eksperymentalna wyników badań numerycznych opakowania testowego

Do rejestracji przebiegów przyspieszeń podczas prób zderzenia opakowania z nieodkształcalnym podłożem wykorzystano tester przedstawiony na rys.7b. W celu przeprowadzenia tego typu badań na tym testerze, w pierwszej kolejności demontujemy bijak (3). W kolejnym kroku obracamy płytę (10) z położenia

pionowego w poziome i blokujemy wkrętem w pozycji równoległej do podstawy (5). Następnie ustawiamy na zadaną wysokość wykorzystując czujnik linkowy (9). Opakowanie (12) zamocowane do elektromagnesu podnosimy, aż do zetknięcia się z płytą pozycjonującą (10). Rozpoczęcie swobodnego opadania następuje tak samo, jak w przypadku bijaka – poprzez rozłączenie elektromagnesu.

Badane opakowanie transportowe (rys.12) składa się ze struktur przeciwwstrząsowych (tektury i pianki polietylenowej) oraz substytutu chronionego produktu, tj. prostopadłościennego bloku o wymiarach  $0,121 \times 0,101 \times 0,101$  m, w którym znajduje się rejestrator przyspieszeń wraz z obciążnikami. W celu osiągnięcia minimalnej gęstości energii zderzenia przyjętej podczas badania materiałów przeciwwstrząsowych, przyjęto blok o masie  $m_{bl}=2,700$  kg, uzyskując całkowitą masę opakowania równą 3,000 kg.



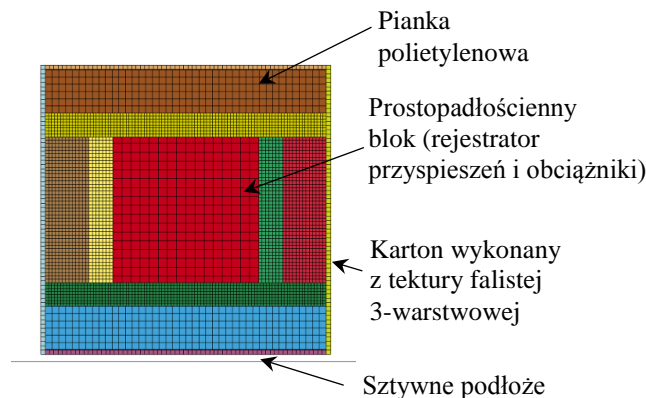
Rys.12. Opakowanie transportowe wraz z rejestratorem.

Grubości materiału opakowaniowego (pełniącego funkcje przeciwwstrząsową) w prostopadłych kierunkach  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (rys.12) przedstawiono w tabeli 1. Opakowanie z wmontowanym rejestratorem przyspieszeń poddawano serii prób swobodnego spadku na gładkie i nieodkształcalne podłoże z wysokości  $h=[0,15; 0,30; 0,45; 0,60]$  m.

Tabela 1. Program badań opakowania.

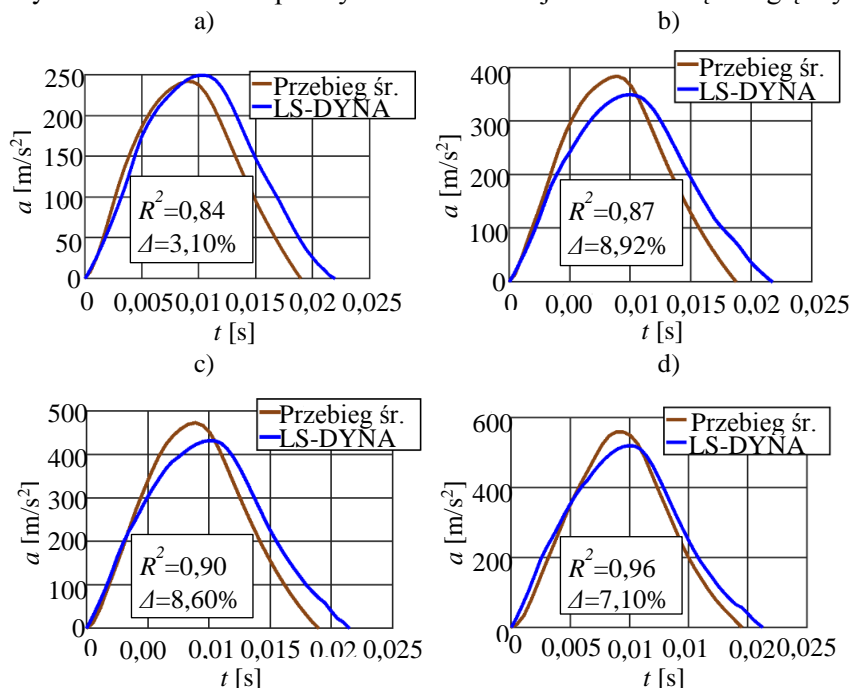
Wymiary opakowania transportowego	Masa całkowita	Grubość materiału opakowaniowego (pianka i tektura)			Wysokość spadku
m	kg	mm			m
0,2 × 0,2 × 0,2	3,0	w osi x	w osi y	w osi z	0,15; 0,30; 0,45; 0,60
		39,5	49,5	49,5	

Przekrój poprzeczny modelu opakowania wykonanego w środowisku LS-DYNA (wg rys.12) w płaszczyźnie  $yz$  przedstawiono na rys.13.

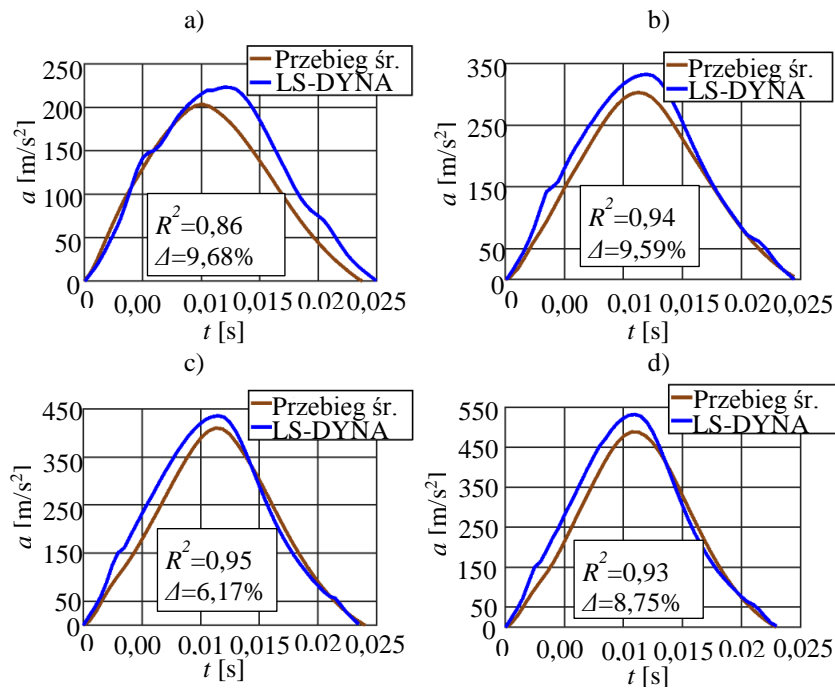


Rys.13.Przekrój modelu opakowania wykonanego w środowisku LS-DYNA (przekrój poprzeczny wzdłuż płaszczyzny  $yz$  – rys.12).

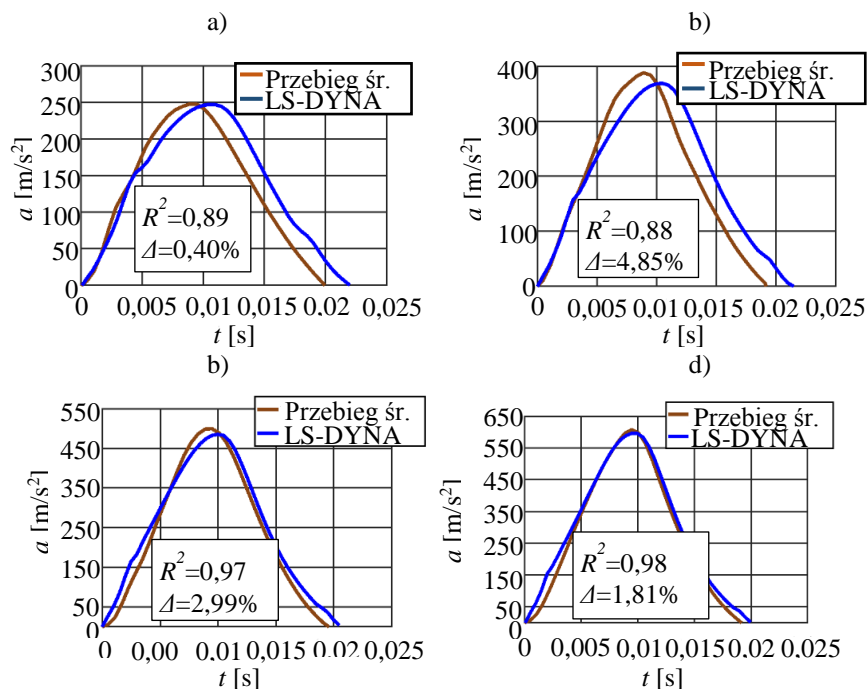
Na rys.14, rys.15 i rys.16 zaprezentowano wyniki symulacji próby swobodnego spadku opakowania transportowego na nieodkształcalne podłoże z wysokości  $h=[0,15; 0,30; 0,45; 0,60]$  m wykonane w środowisku LS-DYNA oraz uśrednione przebiegi przyspieszeń zarejestrowane podczas badań doświadczalnych w poszczególnych prostokątnych kierunkach swobodnego spadku (wg osi  $x, y, z$  na rys.12). Przebieg średni został wyznaczony na podstawie przebiegów przyspieszeń zarejestrowanych podczas 16 prób zderzeń. W celu oceny dopasowania wyników symulacji z eksperymentalnymi zastosowano współczynnik determinacji  $R^2$  oraz błąd względny  $\Delta$  (wzór (20)).



Rys.14.Wykresy przyspieszeń wyznaczonych podczas zderzenia przy próbie swobodnego spadku opakowania wzdłuż osi  $z$  na nieodkształcalne podłoże z wysokości: a)  $h=0,15$  m, b)  $h=0,3$  m, c)  $h=0,45$  m, d)  $h=0,6$  m.



Rys.15. Wykresy przyspieszeń wyznaczonych podczas zderzenia przy próbie swobodnego spadku opakowania wzdłuż osi y na nieodkształcalne podłoże z wysokości: a)  $h=0,15$  m, b)  $h=0,3$  m, c)  $h=0,45$  m, d)  $h=0,6$  m.



Rys.16. Wykresy przyspieszeń wyznaczonych podczas zderzenia przy próbie swobodnego spadku opakowania wzdłuż osi x na nieodkształcalne podłoże z wysokości: a)  $h=0,15$  m, b)  $h=0,3$  m, c)  $h=0,45$  m, d)  $h=0,6$  m.



Z analizy zaprezentowanych wykresów wynika, że najniższą zgodność przebiegów przyspieszeń uzyskano dla wysokości  $h=0,15$  m, w kierunku swobodnego spadku wzdłuż osi  $z$  ( $R^2=0,84$ ; rys.14a), zaś najniższą zgodność wartości maksymalnych przyspieszeń dla wysokości  $h=0,15$  m, w kierunku osi  $y$  ( $\Delta=9,68\%$ ; rys.15a). Ze względu na akceptowalne rozbieżności pomiędzy wynikami badań doświadczalnych i teoretycznych, możemy uznać, że zaproponowane w pracy procedury pozwalają na zaprojektowanie struktur przeciwwstrząsowych opakowania, które będą redukować skutki zderzenia z przeszkodą do zadanej dopuszczalnej wartości przyspieszeń.

W dalszej części pracy dokonano analizy materiału przeciwwstrząsowego o przekroju trapezowym, który także stosowany jest w opakowaniach transportowych.

## 12. Wpływ kąta pochylenia ścian materiału przeciwwstrząsowego o przekroju trapezowym na efektywność łagodzenia skutków zderzenia

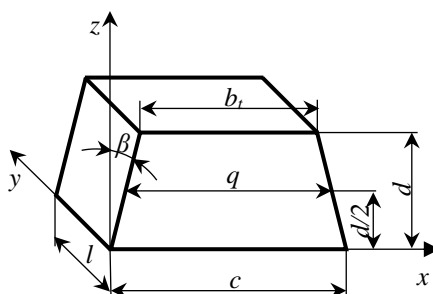
Analizę wpływu kąta pochylenia ściany bocznej przekroju trapezowego struktury przeciwwstrząsowej na uzyskiwane maksymalne przyspieszenie bijaka testera zderzeń (rys.7a) przeprowadzono dla próbki wykonanej z pianki polietylenowej STRATLITE 22 (rys.17). Podczas badań przyjęto próbkę o długości  $l=100$  mm, dla której wymiary podstawy  $b_t$  i  $c$  wyznaczono przy założeniu, że w połowie grubości  $d$  wymiar  $q$  posiada stałą wartość  $q=100$  mm. Znając kąt  $\beta$  możemy wyznaczyć wymiar  $b_t$  równaniem:

$$b_t = q - d \operatorname{tg}\beta \quad (21)$$

a wymiar  $c$  równaniem:

$$c = q + d \operatorname{tg}\beta \quad (22)$$

Stały wymiar  $q$  powoduje, że próbka posiada stałą objętość niezależną od kąta  $\beta$ , stąd badany jest tylko wpływ kąta na uzyskiwane maksymalne przyspieszenie bijaka. Ponadto, zastosowano próbki o dwóch grubościach  $d=[20, 40]$  mm oraz pięciu kątach nachylenia ścian bocznych  $\beta=[0, 15, 30, 45, 60]^\circ$ .

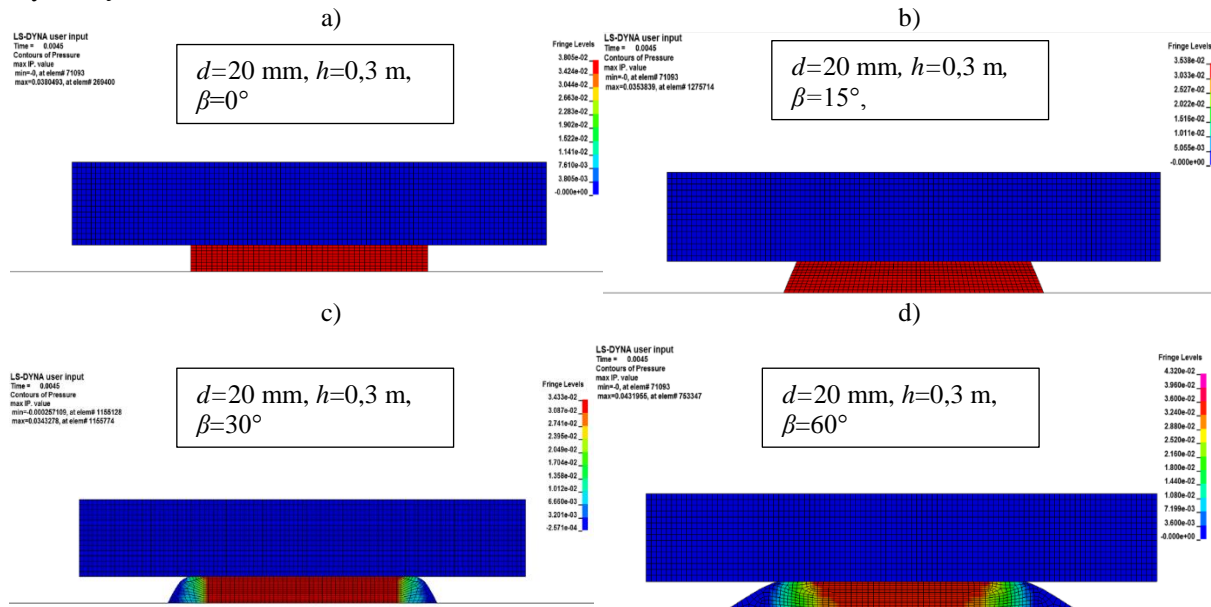


Rys.17. Pianka PE o przekroju poprzecznym w kształcie trapezu z podstawowymi wymiarami.

Przebiegi przyspieszeń bijaka testera zderzeń rejestrowano dla prób swobodnego spadku z wysokości  $h=[0,15; 0,30; 0,45]$  m. Zakres wysokości został tak dobrany, by uwzględnić najbardziej prawdopodobne narażenie opakowań na zderzenie w rzeczywistym procesie transportowym – podobnie, jak w przypadku badań przedstawionych w rozdziale 11.

Badania przeprowadzono zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w rozdziale 9, gdzie dla każdej próbki o zadanej grubości  $d$ , zadanym kącie  $\beta$  oraz wysokości swobodnego spadku  $h$  zarejestrowano 16 przebiegów przyspieszeń.

Na rys.18 przedstawiono rozkład średnich naprężeń  $\sigma_m$  dla próbek o grubości  $d=20$  mm i kącie nachylenia ściany  $\beta=0^\circ$ ,  $\beta=15^\circ$ ,  $\beta=30^\circ$  i  $\beta=60^\circ$ . Rozkłady te zostały wyznaczone podczas symulacji zderzenia dla wysokości swobodnego spadku bijaka  $h=0,30$  m, uzyskując średnie odkształcenia próbki wynoszące około 50%.



Rys.18. Rozkład średnich naprężeń  $\sigma_m$  [MPa] w próbce: a) prostokątnej, b) trapezowej o kącie nachylenia ściany  $\beta=15^\circ$ , c) trapezowej o kącie nachylenia ściany  $\beta=30^\circ$ , d) trapezowej o kącie nachylenia ściany  $\beta=60^\circ$ .

Na rys.18a przedstawiono rozkład średniego naprężenia w próbce prostokątnej. Rozkład ten jest jednakowy w całej objętości próbki. Znaczne zróżnicowanie rozkładu naprężeń można zaobserwować w próbce o przekroju trapezowym przy kącie nachylenia ściany  $\beta=30^\circ$  (rys.18c). W tym przypadku największe naprężenia średnie występuje w centralnej części próbki na całej jej grubości. Najmniejsza wartość naprężenia występująca w narożach próbki wykazuje, że w tych miejscach materiał przeciwwstrząsowy nie bierze udziału w generowaniu sił reakcji przeciwdziałających siłom bezwładności bijaka. Na ruch bijaka efektywnie reaguje tylko środkowa część próbki. W przypadku próbki trapezowej o kącie  $\beta=15^\circ$  (rys.18b) można zauważyć, że rozkład naprężenia średniego w tej próbce jest porównywalny do próbki prostokątnej. Na podstawie przeprowadzonej analizy średniego naprężenia można stwierdzić, że w przypadku kątów  $\beta$  mieszczących się w przedziale  $\beta \in \langle 0^\circ, 15^\circ \rangle$  zabezpieczenia przeciwwstrząsowe będą posiadać przybliżony rozkład naprężeń średnich. W związku z tym tego typu zabezpieczenia przeciwwstrząsowe powinny być projektowane w tym przedziale kąta.

## 13. Wnioski i perspektywa dalszych badań

### 13.1. Wnioski

1. W rozprawie zaproponowano oryginalną procedurę wyznaczania krzywych dynamicznego ściskania materiałów przeciwwstrząsowych na podstawie znanych krzywych amortyzacji udostępnionych przez producenta lub za pomocą własnych badań eksperymentalnych.

2. Procedurę wyznaczenia krzywej dynamicznego ściskania z wykorzystaniem krzywych amortyzacji zweryfikowano, wykorzystując model numeryczny procesu zderzenia do rekonstrukcji źródłowych krzywych amortyzacji uzyskując zgodność 98,5% z krzywymi amortyzacji udostępnionymi przez producenta.
3. Procedura wyznaczenia krzywej dynamicznego ściskania z wykorzystaniem testów zderzeń próbek wykonanych z pianki polietylenowej oraz tektury 3-warstwowej, została zweryfikowana za pomocą błędu  $\varepsilon_r$ :
  - zauważono że maksymalne przyspieszenia uzyskiwane z modeli numerycznych osiągają błąd  $\varepsilon_r=5\% a_{sr}$ ,
  - współczynnik determinacji przebiegów przyspieszenia dla pianki nie jest mniejszy niż  $R^2=0,72$ ,
  - współczynnik determinacji przebiegów przyspieszeń dla tektury –  $R^2=0,27$ ,
  - metoda ta powinna być stosowana, jeżeli producenci nie udostępniają krzywych amortyzacji.
4. Wyznaczone krzywe dynamicznego ściskania wykorzystano w modelu numerycznym odwzorowującym zderzenie testowego opakowania ze sztywnym podłożem:
  - maksymalne przyspieszenia uzyskane z modelu numerycznego osiągają błąd  $\varepsilon_r=10\% a_{sr}$ , a współczynnik determinacji przebiegów przyspieszeń jest nie mniejszy niż  $R^2=0,84$ .
5. Przeprowadzona analiza średnich naprężeń piankowego zabezpieczenia przeciwwstrząsowego o przekroju trapezowym wykazała, że kąt pochylenia ściany bocznej powinien mieścić się w przedziale  $\beta \in \langle 0^\circ, 15^\circ \rangle$ . Wtedy, występujące w próbce naprężenia są porównywalne do naprężeń występujących w próbce o kształcie prostopadłościanu.
6. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych procesu dynamicznego ściskania, określających właściwości przeciwwstrząsowe materiałów w opakowaniach należy uznać za satysfakcjonujące.
7. Sformułowane na podstawie badań eksperymentalnych i symulacji komputerowych wnioski pozwalają potwierdzić słuszność przyjętych hipotez dotyczących opracowania oryginalnych metod wyznaczania krzywych dynamicznego ściskania podczas testów zderzeń.

### 13.2. Perspektywa dalszych badań

1. Opracowanie wytycznych wspomagających proces projektowania opakowań, np. odnośnie zastosowania preferowanego kształtu materiału przeciwwstrząsowego w celu uzyskiwania zadanego przebiegu przyspieszenia.
2. Kontynuowanie badań w kierunku analizy zmian właściwości amortyzujących materiałów przeciwwstrząsowych w przypadku poddawania ich wielokrotnemu zderzeniu. Uzyskane rozwiązanie stanowiłoby nowe podejście w projektowaniu struktur przeciwwstrząsowych, które pozwoliłoby na oszacowanie trwałości opakowań poddawanych wielokrotnym zderzeniom i rozważenie wtórnego wykorzystania tych opakowań w kolejnych przesyłkach.
3. Poszukiwanie i opracowywanie nowych modeli materiałów przeciwwstrząsowych, dokładniej opisujących ich wewnętrzną budowę, np. pianki, tektury, tworzywa pochodzące z recyklingu.