

Prof. dr hab. inż. Adam MAZURKIEWICZ  
Instytut Technologii Eksploatacji –  
– Państwowy Instytut Badawczy  
w Radomiu

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Przemysława OSOWSKIEGO  
pt. „Badania teoretyczne i doświadczalne wybranych materiałów w procesie konstruowania opakowań narażonych na obciążenia spowodowane zderzeniem”

Podstawę formalną recenzji stanowiło pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Pana Profesora Janusza Semprucha, z dnia 18 czerwca 2018 r., informujące o decyzji Rady Wydziału o powołaniu mnie na recenzenta przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

### Ocena problematyki badawczej

Przedmiot recenzowanej rozprawy, zgodnie z założonym celem, stanowiło opracowanie metody umożliwiającej wyznaczanie właściwości amortyzujących materiałów opakowaniowych narażonych na obciążenia spowodowane zderzeniami. We wprowadzeniu pracy podano nawet jej szerszy zakres, stwierdzając, że przedmiotem badań jest „związek pomiędzy właściwościami struktur antywstrząsowych a oddziaływaniami dynamicznymi, jakim poddawany jest produkt wewnątrz opakowania”. Należy jednak uznać, że autor pracy przyjmując w opracowanej metodzie założenie o nieodkształcalności opakowanego produktu zamodelowanego jako graniastosłup wykonany ze stali lub kształtowników aluminiowych, przedstawił ten zakres badań nadmiarowo w stosunku do zrealizowanych prac. Nieco „barokowy” i nadmiarowy jest również tytuł monografii: „Badania teoretyczne i doświadczalne wybranych materiałów w procesie konstruowania opakowań narażonych na obciążenia spowodowane zderzeniem”, ponieważ te *wybrane materiały* to kompozycja pianki polietylenowej z tekturą falistą, a o konstrukcji opakowań przeciwwstrząsowych autor praktycznie nie wspomina. Wydaje się, że zawartość dysertacji lepiej i krótko oddawałby np. tytuł „Metodyka badań materiałów opakowaniowych narażonych na zderzenia”. Dostyć swobodnie podchodzi doktorant również do sformułowanych hipotez twierdząc, że „należy je traktować jako założenia początkowe ... które w trakcie realizacji pracy ... będą poddawane modyfikacji zgodnie z uzyskiwanymi wynikami badań”. Tymczasem hipoteza to „nieudowodniona teoria o wysokim stopniu prawdopodobieństwa” (J. Bogdanienko), „twierdzenie w postaci uogólnienia osiągniętego na podstawie danych wyjściowych” (T. Pilch), lub też „zdanie opisujące związki pomiędzy zjawiskami, którego wartość logiczną sprawdzamy w następstwie badań empirycznych” (E. Hejduk). Hipoteza zatem to pewne przypuszczenie wynikające ze zidentyfikowanego problemu badawczego i powinna być zweryfikowana empirycznie z wykorzystaniem metody naukowej. Zazwyczaj przyjęta hipoteza stanowi podstawę opracowania modelu umożliwiającego jej weryfikację empiryczną, a następnie zastosowanie modelu do rozwiązywania podobnych zagadnień badawczych lub aplikacyjnych. Pomijając jednak dywagacje metodologiczne, można uznać, że postawione przez autora dwie hipotezy badawcze wypełniają swoje zadania merytoryczne, ale jak wynika z analizy pracy ich pozytywna weryfikacja nie doprowadziła do wykorzystania opracowanego modelu (metody) do przykładowego zaprojektowania opakowania, które spełniałoby założone, potencjalne wymagania projektowe, ograniczając się do badania charakterystyk odporności na dynamiczne ściskanie ściśle zadanych struktur materiałów opakowaniowych.

Należy przyznać, że materia badawcza, z którą postanowił zmierzyć się autor dysertacji, jest bardzo skomplikowana. W projektowaniu opakowań należy uwzględnić ogromną liczbę czynników takich jak: funkcje ochronne, magazynowe i transportowe, informacyjne, ekologiczne i ekonomiczne. W swoich rozważaniach doktorant uwzględnił jedyne funkcje ochronne opakowania i to tylko na poziomie opakowań transportowych, tj. tzw. opakowań trzeciego stopnia, które mają ułatwić manipulacje i transport, zapewniając ochronę zawartości przed uszkodzeniami mechanicznymi. Tymczasem bardzo ważnym elementem w tego rodzaju opakowaniach jest również czynnik ekonomiczny, ukierunkowany na wykorzystanie materiałów tanich, pozyskiwanych np. z surowców odpadowych. Takie materiały cechują się niejednorodnością składu i struktury, tj. parametrów zależnych od różnych surowców, z których są wytwarzane. Charakterystyki mechaniczne takich materiałów są zatem bardzo zmienne i różnorodne, niedostępne w bazach MES, a zatem mało przydatne zarówno dla modeli analitycznych, jak i numerycznych, gdzie wymagane są precyzyjnie ustalone wartości materiałowe. W opracowywanych modelach, w tym prezentowanych w przedmiotowej rozprawie doktorskiej, charakterystyki te muszą być uwzględniane w jednolitej, założonej lub oszacowanej wartości uzyskiwanej np. przez tzw. homogenizację. Oczywiście w takich modelach wprowadza się zwykle znacznie więcej założeń upraszczających, np. dotyczących znormalizowanych stanowisk i metod badawczych (w opiniowanej pracy m.in. współczynnik prędkości rzeczywistej bijaka w stosunku do prędkości teoretycznej), co czyni opracowane modele pewnymi etiudami teoretycznymi, ciekawymi poznawczo, ale mało przydatnymi do zastosowań praktycznych. Autor dysertacji zapoznał się ze stosunkowo dużą liczbą takich modeli, prezentując je w dysertacji w bardzo obszernej, obejmującej jedną trzecią objętości pracy, analizie literaturowej. Na tej podstawie zaproponował zakres badań własnych obejmujący m.in.: opracowanie metody wyznaczania naprężeń dynamicznych w funkcji gęstości energii i odkształcenia względnego, zaprojektowanie i wykonanie modelowego stanowiska badawczego do prowadzenia testów zderzeń materiałów opakowaniowych, przeprowadzenie na opracowanym stanowisku badań eksperymentalnych dla wybranej kompozycji materiałów przeciwwstrząsowych oraz wyznaczenie ich charakterystyk dynamicznych zarówno na znormalizowanych próbkach, jak i modelowych opakowaniach, a także opracowanie modeli numerycznych MES symulujących przebieg badań eksperymentalnych.

Za swoje szczególne osiągnięcie poznawcze doktorant uznaje opracowanie – opisaną na kilku stronach monografii – procedury (może raczej metody) wyznaczania krzywych dynamicznego ściskania materiałów opakowaniowych dwoma sposobami: na podstawie krzywych amortyzacji lub wyników badań eksperymentalnych pozyskanych na stanowisku badawczym. Metoda, chociaż niezbyt skomplikowana teoretycznie i uwarunkowana wieloma ograniczeniami i założeniami, została w miarę solidnie zweryfikowana dla wielu wariantów analitycznych i numerycznych.

Podjęty w dysertacji zakres prac świadczy o gruntownym zapoznaniu się doktoranta z szerokim pakietem metod badania opakowań zarówno w odniesieniu do modeli dyskretnych, jak i ciągłych, jak również opanowaniu instrumentarium metod analitycznych, doświadczalnych i numerycznych, pozwalających charakteryzować właściwości wybranych materiałów opakowaniowych i ich kompozycji oraz zaproponowaniu na tej podstawie własnej metodyki badawczej.

**Biorąc pod uwagę przytoczone aspekty dotyczące problematyki badawczej, zakres przeprowadzonych studiów literaturowych oraz kompleksowość podejścia do rozwiązania bardzo skomplikowanego zagadnienia, należy uznać podjęcie tematu rozprawy za celowe i uzasadnione merytorycznie, jak również aktualne i wartościowe pod względem poznawczym.**

## Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa została zawarta na 120 stronach i obejmuje wykaz zastosowanych w pracy ważniejszych symboli i skrótów, wprowadzenie, sześć rozdziałów merytorycznych, wykaz literatury oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Wykaz literatury zawiera 123 pozycje: publikacje naukowe (114) i normy (9), z czego 25 zostało opublikowanych po roku 2013, tj. w ostatnich pięciu latach. W wykazie literatury zostały zamieszczone 4 publikacje współautorstwa doktoranta.

We Wprowadzeniu doktorant zaprezentował, w ogólnym ujęciu, przesłanki podjęcia badań dotyczących doboru materiałów i struktur przeciwwstrząsowych do konstruowania opakowań oraz scharakteryzował układ pracy. Zasadnicza, zasygnalizowana już wątpliwość dotyczy przedstawionego przedmiotu pracy. Z treści rozprawy wynika jednoznacznie, że doktorant zajmował się badaniem związków pomiędzy właściwościami struktur przeciwwstrząsowych i oddziaływaniami dynamicznymi na opakowanie a nie, jak to sformułował, oddziaływaniami dynamicznymi na produkt umieszczony w opakowaniu. Wskazana niespójność jest oczywista w konfrontacji z zasadniczym osiągnięciem pracy, za który można uznać nową wiedzę dotyczącą zastosowania krzywej dynamicznego ściskania w modelowaniu struktur przeciwwstrząsowych opakowań. Zasygnalizowany we Wprowadzeniu wybór do badań dwóch rodzajów materiału opakowaniowego: pianki polietylowej i tektury trójwarstwowej determinuje stosunkowo ograniczoną możliwość weryfikacji opracowanych autorskich rozwiązań.

Analiza aktualnego stanu wiedzy w przedmiotowym obszarze badawczym została bardzo obszernie zaprezentowana w rozdziale pierwszym i dotyczy podstawowych zagadnień modelowania zderzeń opakowania wykonanego z materiału przeciwwstrząsowego z powierzchnią nieodkształcalną. Doktorant przedstawił powszechnie stosowaną, ogólną klasyfikację opakowań wraz z charakterystyką ich funkcji. W opisie zabrakło wyjaśnienia do stwierdzenia, że kontenery nie są zaliczane do opakowań transportowych. Doktorant powołując się na źródła literaturowe wskazał krzywą amortyzacji jako podstawową charakterystykę zdolności materiału do realizacji funkcji przeciwwstrząsowych stosowaną w klasycznej metodzie projektowania opakowań. Przyjął model fizyczny opakowań wprowadzając, jak to określił, „uproszczenia i założenia podporządkowane opisowi zjawiska zderzenia”. Podstawowym założeniem z punktu widzenia badań eksperymentalnych jest zastąpienie rzeczywistej struktury tektury trójwarstwowej przez jednorodny materiał, wykorzystując w tym celu homogenizację numeryczną. Argumentacja autora wskazująca, że dzięki takiemu uproszczeniu nastąpi znaczące skrócenie czasu analizy, wydaje się wątpliwa zarówno ze względu na współczesne możliwości technik obliczeniowych, jak również wobec głównego celu, ukierunkowanego na możliwie wierne odzwierciedlenie w modelu struktury rzeczywistej, co determinuje adekwatność wyników i jakość zaprojektowanego opakowania. Uzupełniających wyjaśnień wymaga rys. 1.3 i podstawa przyjęcia podanych granic przedziałów czasu dla poszczególnych przypadków obciążeń. W dalszej części rozdziału autor przedstawił, w ogólnym ujęciu, wybrane modele zderzeń ciał stałych według podziału na modele dyskretne oraz modele ciągłe, obejmujące modele lokalne i modele falowe. W konkluzji doktorant uznał, że do analizy zderzenia opakowania ze sztywnym podłożem należy zastosować model lokalny. Wybór ten nie wynika jednak z zamieszczonych opisów, gdzie autor przedstawił jedynie podstawowe zależności opisujące modele i ich ograniczenia, nie podejmując kompleksowej analizy i porównania ich zalet i ograniczeń. Niezrozumiały jest cel zamieszczenia na czterech stronach opisu modeli falowych, których wykorzystanie w tego typu strukturach należało z założenia wykluczyć. W rozdziale przedstawiono także modele zderzeń bijaka z materiałem przeciwwstrząsowym. Przyjęte założenie o znikomej masie warstw materiałów

przeciwwstrząsowych w porównaniu z masą bijaka stanowi znaczące ograniczenie modelu i wymaga wyjaśnienia, mając na uwadze adekwatność modelu i rzeczywiste możliwości zastosowania opracowanej autorskiej metody w praktyce. Doktorant dość niefrasobliwie stosuje kolokwialne sformułowania typu: „kontrolowane uginanie się komórek”, „komórki zdominowane przez materiał”, „moduł odkształcenia postaciowego, który powinien być pozytywny”. Krytyczna ocena możliwości zastosowania metody elementów skończonych do modelowania pianki z zamkniętymi komórkami nie kończy się jednoznacznym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonej analizy. Doktorant wskazał na model materiału MAT 57 opisujący właściwości pianki hiperelastycznej, dostępny w programie do analizy zjawisk szybkozmiennych LS-DYNA, w zasadzie nie uzasadniając podjętego wyboru. Zabrakło również szerszej argumentacji dla założenia o zastąpieniu w modelowaniu numerycznym tektury trójwarstwowej przez piankę o małej grubości. Przedstawiony wykres na rys. 1.24 wydaje się nie potwierdzać słuszności przyjętego założenia.

W rozdziale drugim podano cel, hipotezy i zakres rozprawy. Cel pracy został ukierunkowany na opracowanie metody wyznaczania właściwości przeciwwstrząsowych materiałów oraz wykorzystania jej wyników w modelowaniu materiałów z zastosowaniem metody elementów skończonych. Podstawowe przesłanki podjętych prac badawczych wynikają z ograniczeń dotychczas stosowanej, klasycznej metody wykorzystującej krzywe amortyzacji, które nie odzwierciedlają rzeczywistych efektów dynamicznych występujących w trakcie zderzenia materiału z podłożem, a ponadto wymagają przeprowadzenia znacznej liczby testów w celu eksperymentalnego potwierdzenia adekwatności modelu. W przedstawionych hipotezach (błędnie określonych jako założenia początkowe) doktorant przyjął za możliwe zastosowanie krzywych dynamicznego ściskania materiałów do kształtowania struktur przeciwwstrząsowych opakowań. Przedmiotem dyskusji podczas publicznej obrony powinna być głównie druga hipoteza przewidująca możliwość wyznaczania krzywych dynamicznego ściskania z wykorzystaniem krzywych amortyzacji. Przyjęta hipoteza wydaje się być w sprzeczności z przesłankami celu pracy, jak również przedstawioną przez Autora krytyczną oceną jakości wyników modelowania z wykorzystaniem krzywych amortyzacji.

W rozdziale trzecim przedstawiono autorską procedurę wyznaczania krzywej dynamicznego ściskania na podstawie krzywych amortyzacji lub wyników testów przeprowadzonych na testerze zderzeń. Doktorant niekonsekwentnie stosuje określenia „krzywa dynamicznego ściskania” i „krzywa dynamicznego naprężenia”. Zasadne jest pytanie, jak opracowana metoda wykorzystująca krzywe amortyzacji odzwierciedla dynamiczne efekty występujące w trakcie zderzenia materiału z podłożem. W metodzie wyznaczania krzywej dynamicznego ściskania na podstawie wyników badań przeprowadzonych na testerze zderzeń wprowadzono podział zakresu gęstości energii na przedziały. Zasada podziału zakresu, jak również określenie „optymalizacja numeryczna” zamiast aproksymacja powinny być przedmiotem wyjaśnień. Wyjaśnienia wymaga także metoda tworzenia krzywej naprężenia dynamicznego w funkcji gęstości energii (rys. 3.2) oraz poprawność wyrażenia (3.10) w odniesieniu do analogicznego wywodu przedstawionego w pracy, której współautorem jest doktorant (poz. 80 wykazu literatury).

Weryfikacja eksperymentalna metody do wyznaczania krzywej dynamicznego ściskania została przedstawiona w rozdziale czwartym. Opracowany przez doktoranta tester zderzeń, dzięki możliwości rekonfiguracji, pozwala na realizację zarówno badań próbek materiałów przeciwwstrząsowych, jak i kompletnych opakowań. Zasadność zastosowania w opracowanym urządzeniu niektórych rozwiązań konstrukcyjnych i sprzętowych powinna być przedmiotem uzupełniających wyjaśnień doktoranta, dotyczących m.in. zastosowania prowadzenia jednostronnego zamiast dwustronnego, zastosowania kolorowej kamery cyfrowej zamiast czujnika przemieszczeń liniowych. W weryfikacji stanowiska pominięto podstawowe zagadnienie, jakim jest analityczne wyznaczenie niepewności pomiarów prędkości,

uwzględniając rozdzielczość obrazowania, błąd perspektywy kamery oraz rozmycie obrazu. Badania weryfikacyjne przeprowadzono dla pianki polietylowej i tektury falistej trójwarstwowej, nie podając jednak zasady doboru liczby próbek i przeprowadzonych testów. Zabrakło także wyjaśnienia znacznych rozbieżności w wartościach ilorazu  $h_{kor}/h$  w kolejnych próbach dla tektury falistej, który w przypadku pianki jest stabilny. Wyniki weryfikacji modelu numerycznego pokazały znaczne rozbieżności pomiędzy wykresem przyśpieszeń uzyskanym na drodze eksperymentalnej a stanowiącym rezultat symulacji numerycznej. Niedośyt wywołuje więc brak szerszego komentarza doktoranta i rzetelnej oceny uzyskanych wyników pracy. Kryterium oceny, czy model jest prawidłowy, zależy od wartości błędu  $\varepsilon_r$ , którego zasada doboru nie została wyjaśniona. Doktorant przeprowadził badania kompletnych opakowań o masie 3 kg, w związku z tym brak jest logicznego uzasadnienia dla umieszczenia w pracy rys. 4.21. Na przekroju modelowego opakowania, zaprezentowanym na rys. 4.24, brak opisu niektórych występujących na nim elementów, co prowadzi do spekulacji, czy jest to struktura uźebrowana, o której autor wspomina w tekście, nigdzie jej jednak formalnie nie definiując. Przedstawione uzasadnienie dla zwiększenia wartości błędu  $\varepsilon_r$  jako kryterium oceny modelu nie powinno wynikać z faktu, że model numeryczny jest zbyt złożony, co nie zostało poparte żadną analizą i powinno być przedmiotem dyskusji podczas publicznej obrony.

Przykład zastosowania zgromadzonej wiedzy w zakresie modelowania analitycznego i numerycznego materiałów przeciwwstrząsowych doktorant przedstawił w rozdziale piątym. W tej części pracy koncentruje się na wąskim zagadnieniu badań wpływu pochylenia ścian materiału przeciwwstrząsowego o przekroju trapezowym na efektywność łagodzenia skutków zderzenia. Z analizy wprowadzenia do rozdziału nie wynika jasno celowość realizacji badań dla wybranego przekroju. Stąd pytanie, jaki jest związek pomiędzy strukturą trapezową a uźebrowaną? W programie badań przyjęto zakres wysokości dla swobodnego spadku bijaka do 0,45 m. Rezygnacja z badań dla wysokości spadku 0,6 m, która jest uwzględniona w badaniach opisanych w rozdziale 4.4, jak również wybór dwóch grubości próbki powinny być uzasadnione. Zasadnicza wątpliwość dotyczy liczby przeprowadzonych prób testowych. Z wykresów przedstawionych na rys. 5.4 wynika, że łączna liczba prób wynosi 30, natomiast w opisie przeprowadzonych badań podano liczbę 16. W związku z tym doktorant powinien wyjaśnić, czy normalność rozkładu przeprowadzonych prób została potwierdzona w teście Shapiro-Wilka w sposób poprawny? Eksperymentalna weryfikacja modelu analitycznego pokazała, że prawidłowe odwzorowanie próbki występuje jedynie dla kątów nachylenia do  $15^\circ$ , czyli dla kształtu przekroju bliskiego prostokątowi. Nasuwa się pytanie, czy stwierdzona przez autora adekwatność modelu dla małych kątów nachylenia ścian trapezu nie wynika z przyjętej wartości błędu  $\varepsilon_r$  dającej znaczny zakres tolerancji błędów  $b_b$  i  $b_w$ . W końcowej części rozdziału przedstawiono także rozkłady średnich naprężeń potwierdzające główną rolę centralnej części próbki w przenoszeniu obciążeń i znikome znaczenie naroży trapezu w dolnej podstawie. Z przedstawionych wyników badań wynika wniosek, że przeprowadzone przez doktoranta eksperymenty badawcze dotyczące zmiany kształtu przekroju próbki z prostokątnego na trapezowy nie przyniosły pozytywnych rezultatów uzasadniających celowość stosowania kształtu trapezowego. Zabrakło także analizy korelacji kształtu wypełnienia z uźebrowaniem opakowania.

W rozdziale szóstym przedstawiono wnioski podsumowujące uzyskane wyniki pracy. Doktorant, odwołując się do wyników zrealizowanych badań, sformułował wniosek o potwierdzeniu hipotez przyjętych na wstępie rozprawy. Można uznać, że hipoteza o możliwości wyznaczenia krzywej dynamicznego ściskania dla materiału piankowego o zamkniętych komórkach z wykorzystaniem krzywych amortyzacji lub danych z prób swobodnego spadku została potwierdzona. Należy jednak wziąć pod uwagę wątpliwości dotyczące jakości wyników modelowania z wykorzystaniem krzywych amortyzacji z uwagi na brak odzwierciedlenia efektów dynamicznych występujących w procesie zderzenia, co wskazał

sam doktorant w opisie celu rozprawy. Przedmiotem dyskusji podczas publicznej obrony powinna być hipoteza dotycząca oczekiwanych właściwości mechanicznych struktur przeciwwzderzeniowych opakowań kształtowanych w procesie projektowania wspomaganego komputerowo, stosując krzywe dynamicznego ściskania materiałów konstrukcyjnych wyznaczone metodą energetyczną na podstawie prób swobodnego spadku. Przedstawione wyniki badań wywołują wątpliwość, czy w pracy właściwie udokumentowano weryfikację tej hipotezy. Doktorant słusznie wskazał ograniczenia zaproponowanego rozwiązania wynikające z założenia jednorodności struktury oraz potwierdzenia skuteczności metody jedynie dla wybranych materiałów przeciwwstrząsowych (pianki polietylenowej i tektury falistej trójwarstwowej). Należy oczekiwać, że zaproponowana metoda modelowania będzie uwzględniać możliwość zastosowania do realizacji funkcji przeciwwstrząsowych różnego rodzaju materiałów otrzymywanych np. z zastosowaniem technologii recyklingu. Założenie o jednorodności materiału stanowi zatem znaczące ograniczenie modelu. Należy zgodzić się z autorem pracy w kwestii celowości kontynuacji badań w przedmiotowym obszarze problemowym. Przedmiotem krytycznej analizy i ponownych przemyśleń powinien być jednak sposób ukierunkowania przyszłych badań na zastosowanie ich wyników do praktycznego wspomaganie projektowania kształtu i struktury materiału przeciwwstrząsowego. Zaproponowanym przez doktoranta wartościowym kierunkiem badań będzie niewątpliwie analiza zmian właściwości materiałów przeciwwstrząsowych poddawanych wielokrotnym zderzeniom z podłożem.

### Wybrane uwagi szczegółowe

Poziom redakcyjny rozprawy nie jest zbyt staranny. W tekście występuje sporo błędów literowych, przesunięć tekstu; zamieszczono także kilka rysunków w angielskiej wersji zapewne przekopiowanych z innych publikacji doktoranta. Na niektórych rysunkach brakuje właściwych oznaczeń. Stwierdzono także sporo błędów natury językowej i stylistycznej, m.in.:

- str. 3 – tytuł rozdziału „Kompletne opakowanie” nie oddaje jego zawartości;
- str. 5 – opakowania nie powinny mieć odniesienia „krajowego” ale np. „branżowe”;
- str. 11 i inne – nieuzasadnione i stanowczo nadużywanie słowa „określono” zamiast np. wyznaczono; założono itd.;
- str. 23 – „ w powyższym równaniu” – powinno być „w poniższym równaniu”;
- str. 26 – trudno zrozumieć co oznacza: „kwestia jest nierealistyczna”;
- str. 31 - zamiast „jest równa masie oraz przyspieszeniu” – powinno być „jest równa iloczynowi masy i przyspieszenia”;
- str. 36, 37, 39, 40 – sloganowe zapisy: „potrzebne do uchwycenia nieliniowego zachowania pianki”; „potrzebne dla stabilności procesu symulacji modelu”; mechaniczne właściwości pianki o zamkniętych komórkach są zdominowane przez materiał ... oraz gaz”; „moduł odkształcenia postaciowego powinien być pozytywny”;
- str. 79, 110 – błędy ortograficzne „bez podstawny”, „pozwoliło by”;
- str. 117 (pozycja [109] w wykazie literatury) – „Strong” – poprawnie „Stronge” jak w [110].

Uwagę zwracają także przypadki braku starannego opracowania rysunków oraz kompletności objaśnień w zapisach zależności funkcyjnych, m.in.:

- str. 26 –  $m_i$  – nie występuje we wzorze (1.33);
- str. 34 – brak symboli funkcji  $f_i$  w równaniu (1.55);
- str. 35 – brak objaśnień symboli  $a_1, a_2, a_n$  oraz  $b_1, b_2, b_k$ ;
- str. 31 – brak objaśnień symboli  $\omega_v$  i  $\xi$ ;
- str. 61 (rys. 4.5, rys. 4.6), str. 62 (rys. 4.7), str. 63 (rys. 4.8) – „funkcji”;
- str. 83 (rys. 4.24) – niekompletny opis elementów przekroju.

## Podsumowanie i konkluzja

Podsumowując finalnie uzyskane wyniki rozprawy doktorskiej, należy uznać, że podjęta przez doktoranta problematyka jest interesująca poznawczo, aktualna, ale bardzo złożona merytorycznie i metodycznie. Stąd przedmiot badań, który stanowiło opracowanie metody umożliwiającej wyznaczenie dynamicznych właściwości przeciwwstrząsowych materiałów opakowaniowych amortyzujących skutki zderzeń, jest trudny do zamodelowania zarówno fizycznego, analitycznego, jak i numerycznego. Doktorant podjął się tego zadania, wprowadzając jednak w opracowanych modelach wiele założeń ograniczających, które co prawda pozwoliły zamodelować analitycznie i numerycznie rozważane dynamiczne procesy zderzeniowe ściśle określonych struktur materiałów opakowaniowych, ale jak się wydaje, w wysokim stopniu ograniczają praktyczne zastosowanie opracowanego rozwiązania. Zdaniem recenzenta opracowana metoda, na obecnym etapie zaawansowania, nie pozwala jeszcze na jej wykorzystanie do kształtowania właściwości struktur przeciwdzierzeniowych w procesie wspomaganego komputerowo praktycznego projektowania opakowań, ale może być przydatna np. w badaniach charakterystyk nowych materiałów opakowaniowych.

Za osiągnięcia rozprawy można uznać:

- szeroką analizę modeli i metod stosowanych w badaniach materiałów opakowaniowych;
- zaproponowanie autorskiego modelu wyznaczenia naprężeń dynamicznych występujących w wyniku zderzeń w materiałach opakowaniowych w funkcji gęstości energii, z wykorzystaniem metody MES;
- opracowanie stanowiska badawczego i procedur umożliwiających empiryczną i numeryczną weryfikację zaproponowanej metody.

Do mankamentów rozprawy zaliczam w szczególności niedoskonałości metodyczne, i to zarówno dotyczące ogólnej metodyki badań (sformułowanie hipotez), jak i metodyki prowadzonych badań własnych, w tym występujący niekiedy brak analiz ograniczających zakres uprawionego wnioskowania. Redakcja monografii zawiera pewne niedostatki m.in. przytoczone w niniejszej opinii nieścisłości terminologiczne, a także usterki edytorskie i stylistyczne. Przedstawione uwagi krytyczne dotyczące głównie formalnej strony metodyki badań oraz weryfikacji praktycznej uzyskanych wyników, powinny stanowić przedmiot dyskusji podczas publicznej obrony.

Pomimo stwierdzonych, zapewne w niektórych przypadkach dyskusyjnych, pewnych mankamentów rozprawy doktorant wykazał się wysokimi kompetencjami w zakresie technik instrumentalnych prowadzenia badań, a także weryfikacji i interpretacji uzyskanych wyników. Ważnym elementem dysertacji jest perspektywa dalszych badań, które powinny docelowo prowadzić do opracowania modeli i procedur umożliwiających badanie charakterystyk zderzeniowych szerokiej gamy materiałów opakowaniowych, z uwzględnieniem kryteriów ekonomicznych i ekologicznych ich zastosowania.

**Uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Przemysława Osowskiego spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Radą Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.**

Radom, dnia 16 sierpnia 2018 r.

