

dr hab. inż. Tomasz MACHNIEWICZ
Katedra Wytrzymałości, Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji
Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie

RECENZJA

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

Podstawą formalną opracowania recenzji jest zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii
Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno – Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
w Bydgoszczy z dnia 18.06.2018 r.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Oceniana praca dotyczy opakowalnictwa, a więc relatywnie nowego działu nauki zajmującego się
m.in. zagadnieniami prawidłowego zabezpieczenia wyrobu poprzez odpowiedni dobór konstrukcji
opakowania i jego tworzywa. Jest to więc temat bardzo pragmatyczny i zarazem niezmiernie aktualny
w dobie globalnego handlu i powszechnej sprzedaży wysyłkowej. W tych warunkach dynamiczny
rozwój opakowalnictwa jest procesem istotnym z punktu widzenia interesu społecznego, a wymiernie
wspomóc go można dzięki zastosowaniu nowoczesnych narzędzi i metod badawczych rozwijanych
dotąd w ramach takich dyscyplin jak Mechanika lub Budowa i Eksploatacja Maszyn. Uzasadnia to w
pełni celowość podjęcia tematu rozprawy.

Praca ma formę książki formatu 162 x 235 mm i składa się z sześciu rozdziałów rozmieszczonych na 114 stronach. Pierwszy z nich (39 stron) poświęcony jest analizie aktualnego stanu wiedzy i koncentruje się w głównej mierze na przeglądzie literatury dotyczącej tematu rozprawy. Pozostałe rozdziały (63 strony) dotyczą - z pewnymi wyjątkami - własnych badań Doktoranta. Całość poprzedza *wykaz ważniejszych oznaczeń* (2 strony) oraz zamyka *spis literatury* (8 stron) obejmujący 123 pozycje.

Ogólną strukturę pracy, pomijając dalej wymienione drobne uwagi, można uznać za właściwą. Objętościowo większa część pracy przedstawia własny wkład Doktoranta we wzbogacenie aktualnego stanu wiedzy o nowe wyniki eksperymentalne i opracowanie nowych koncepcji obliczeniowych. Duża liczba przywoływanych pozycji literaturowych, już na etapie pobieżnej oceny pracy wskazuje na dobre rozeznanie Doktoranta w stanie wiedzy dotyczącej podejmowanej w rozprawie tematyki. Baza bibliograficzna jest aktualna; blisko połowa przywoływanych pozycji (57) pochodzi z ostatnich 10 lat a 15 - z ostatnich dwóch lat. Spis literatury obejmuje także 4 publikacje których Doktorant jest współautorem, w tym jedną opublikowaną w czasopiśmie z listu JCR, jedną w materiałach z konferencji międzynarodowej i dwie w materiałach z konferencji krajowych.

Praca zawiera łącznie 69 rysunków; 24 spośród nich dotyczy przeglądu literatury (rozdział 1), zaś pozostałe 45 stanowi autorskie schematy i wykresy opisujące wykonane przez Doktoranta badania, analizy i ich wyniki. Część przeglądową uzupełnia 1 tabela; 17 tabel opisuje wyniki badań własnych Doktoranta. Na ogół przedstawione ilustracje i tabele cechuje wysoki poziom graficznego dopracowania, są przejrzyste, czytelne i łatwe w interpretacji. Z dużą starannością i konsekwencją odwoływano się tekście do poszczególnych ilustracji, tabel i równań.

We Wprowadzeniu Doktorant przedstawił zakres tematyczny rozprawy i celowość podjęcia tej tematyki, wskazując na konieczność zabezpieczenia towarów w trakcie transportu, a w tym względzie na rolę opakowań oraz właściwego doboru ich materiałów i geometrii, co można obecnie realizować na drodze projektowania wspomaganego komputerowo. Wymaga to jednak znajomości krzywych dynamicznego ściskania materiałów przeciwwstrząsowych, których wyznaczenie jest głównym tematem ocenianej pracy. Można uznać, że celowość podjęcia tematu rozprawy została przekonująco wyjaśniona.

W Rozdziale 1 przedstawiono ogólny stan wiedzy na temat roli opakowań oraz stawianych im wymagań, w kontekście różnych czynników i oddziaływań na jakie są one narażone, a także dokonano ogólnej charakterystyki i klasyfikacji opakowań. Kolejno omówiona została eksperymentalna metoda wyznaczania krzywych amortyzacji materiałów przeciwwstrząsowych, a następnie elementy składowe modelowania procesów zderzania - tj. model fizyczny opakowania, wybrane modele zderzeń i model matematyczny materiału - umożliwiające wyznaczenie tych krzywych na drodze numerycznej. Z pewnymi zastrzeżeniami, przytoczonymi w dalszej części recenzji, można uznać, że część przeglądowa rozprawy, chociaż nie jest zbyt obszerna, stwarza właściwe tło do

przewodzenia własnych analiz i oceny wkładu recenzowanej pracy w rozwój rozważanej tematyki naukowej.

Cel, hipotezy badawcze i zakres rozprawy przedstawione zostały w rozdziale 2 i ich ranga jest odpowiednia jak dla pracy doktorskiej. W jednej z hipotez dopatrzeć się można pewnych niekonsekwencji wskazanych w dalszej części recenzji.

Jako cel główny Doktorant przyjął opracowanie metodyki wyznaczania własności przeciwwstrząsowych materiałów stosowanych w wypełnieniach opakowań, która pozwoliłaby ograniczyć zakres czasochłonnych badań eksperymentalnych dzięki wykorzystaniu metod analitycznych i numerycznych. Założono, że własności mechaniczne struktur przeciwwstrząsowych będzie można modelować numerycznie z wykorzystaniem krzywych dynamicznego ściskania wyznaczonych dla zastosowanych materiałów metodą swobodnego spadku. Opracowana przez Doktoranta procedura wyznaczania tych krzywych przedstawiona została w rozdziale 3. Zgodnie z nią zaproponowano, by krzywą dynamicznego ściskania, tj. zależność naprężenia od odkształcenia rozważanego materiału antywstrząsowego, odpowiadającą warunkom obciążenia dynamicznego, wyznaczać na podstawie przyspieszeń jakich doznaje bijak w trakcie uderzenia w rozważany materiał, zarejestrowanych podczas szeregu prób o różnych energiach początkowych bijaka. Weryfikację tej metodyki przeprowadzono w rozdziale 4, wykorzystując tak wyznaczone krzywe jako dane wejściowe do symulacji zderzeń, prowadzonych metodą elementów skończonych dla dwóch materiałów, tj. pianki polietylenowej oraz pakietu tektury falistej. Wykazano, że uzyskane w ten sposób teoretyczne przebiegi przyspieszeń odpowiadały, przy założonej tolerancji błędu, wartościom zarejestrowanym w trakcie analogicznych eksperymentów, co dało podstawę pozytywnej weryfikacji opracowanej procedury. Dodatkowo, jej weryfikację rozszerzono o przypadki swobodnego spadku kompletnego opakowania, złożonego z kartonu oraz pianki polietylenowej (podrozdział 4.4), a następnie (Rozdział 5) o przypadki swobodnego spadku bijaka na piankę polietylenową o kształcie trapezowym. Warto zwrócić uwagę, że masa kompletnego opakowania jakie poddano analizie była inna niż masa bijaka w próbach służących wyznaczeniu dynamicznych krzywych ściskania, co czyni weryfikację opracowanej procedury bardziej ogólną. W celu analiz zderzeń z użyciem pianki trapezowej, oprócz modelu numerycznego, zweryfikowanego pozytywnie, opracowano także i zastosowano model analityczny, którego wyniki jednak odbiegały od danych eksperymentalnych poza przyjętą tolerancję błędu. Przedstawione w rozdziale 6 wnioski w zwięzły sposób odnoszą się do najbardziej istotnych wyników pracy.

Ostatecznie należy uznać, że założone cele pracy zastały osiągnięte, a opracowana metodyka wyznaczania dynamicznej krzywej ściskania materiałów przeciwwstrząsowych została pozytywnie zweryfikowana w dostatecznie szerokim zakresie. Przy okazji praca ujawnia, że Doktorant opanował szereg umiejętności potrzebnych do swobodnej pracy naukowej w reprezentowanej dyscyplinie,

takich jak: planowanie eksperymentu, konstrukcja i budowa stanowiska badawczego, prowadzenie badań eksperymentalnych, znajomość rachunku tensorowego, a także sprawne posługiwanie się metodą elementów skończonych oraz analizą statystyczną.

2. Najważniejsze osiągnięcia Doktoranta

Do najważniejszych udokumentowanych w pracy osiągnięć Doktoranta zaliczyć należy:

- a) Opracowanie nowatorskiej procedury wyznaczania dynamicznej krzywej ściskania dla materiałów przeciwwstrząsowych stosowanych jako wypełnienia opakowań. Rozwiązanie to opiera się na metodzie energetycznej i wykorzystuje przebiegi przyspieszeń rejestrowane w trakcie prób swobodnego spadku bijaka na badany materiał. W stosunku do podejścia wykorzystującego krzywe amortyzacji materiału, zaproponowana metoda pozwala na ograniczenia liczby badań eksperymentalnych dzięki wykorzystaniu metod analitycznych i numerycznych, a równocześnie, w odróżnieniu od metod statycznych, uwzględnia zachowanie się materiału w warunkach obciążenia dynamicznego.
- b) Pozytywna weryfikacja opracowanej metodyki polegająca na porównaniu przebiegów przyspieszeń rejestrowanych w eksperymentach z wynikami analogicznych symulacji zderzeń, w których jako danych wyjściowe użyto dynamicznych krzywych ściskania opracowanych w myśl zaproponowanie metodyki. Proces weryfikacji obejmował liczne zmienne, a mianowicie: dwa różne materiały (pianka polietylenowa i tektura falista), różne energie/prędkości zderzeń, 2 różne kształty elementu przeciwwstrząsowego (prostokątny i trapezowy o różnych kątach pochylenia ścianek) oraz dwa typy zderzeń, tj. w warunkach swobodnego spadku bijaka i swobodnego spadku kompletnego opakowania, przy różnych masach obu tych elementów.
- c) Powyższe osiągnięcia wymagały skutecznej realizacji celów pośrednich, takich jak:
 - zaprojektowanie, zbudowanie i przetestowanie stanowiska badawczego,
 - zaplanowanie i realizacja badań eksperymentalnych,
 - opracowanie numerycznych modeli zderzeń z użyciem MES,
 - statystyczna analiza uzyskanych wyników pod kątem weryfikacji postawionych hipotez badawczych.

3. Uwagi krytyczne

Analiza tekstu rozprawy nasuwa także pewne uwagi, zapewne w części dyskusyjne.

- a) W części teoretycznej pracy zabrakło w moim odczuciu przeglądu i systematyki stosowanych materiałów przeciwwstrząsowych, jako szerszego kontekstu dla wyboru takich a nie innych materiałów ujętych w badaniach eksperymentalnych i analizach numerycznych. W związku z tym

też pojawiają się pewne pojęcie lub parametry niewyjaśnione, a nawet nie opatrzone odwołaniem (np. „tektura 3-warstwowa o fali B” - s. 16), a szeroki wachlarz właściwości pianek ograniczony został jedynie do jednej cechy, tj. otwarto- bądź zamkniętokomórkowości (s. 38).

- b) Str. 20 - Słowna definicja impulsu siły ściskającej („siła P pojawiająca się w chwili t_0 i działająca do chwili t_m ”) jest nieprecyzyjna.
- c) Str. 22 - niekonsekwencje w opisie rys. 1.8:
- (i) czy praca w fazie restytucji to: W_f - jak w podpisie rys. 1.8, czy $W_f - W_c$ - jak w tekście pod rysunkiem?
- (ii) z równań (1.4) i (1.5) a także z rys. 1.5 wynika, że impuls siły restytucji może być co najwyżej równy impulsowi siły ściskającej ($S_f \leq S_c$), tymczasem z rys. 1.8 a także z równań (1.23-1.24) wynika że jest akurat przeciwnie ($S_f > S_c$).
- Czy w związku z tym, równanie (1.20) rzeczywiście opisuje pracę siły chwilowej w trakcie restytucji, czy raczej całkowitą zmianę energii w trakcie zderzenie (dla zderzenie sprężystego $S_f = S_c$, wówczas rów. 1.20 daje w wyniku wartość 0)?
- d) Str. 37 – trudno zaakceptować formę równania (1.66); w założonym modelu przebieg prędkości jest nieciągły dla $y(t)=0$.
- e) Str. 47 – rys. 1.24 prezentuje zależność naprężenia w tekturze falistej od jej ugięcia. Biorąc pod uwagę anizotropię tektury falistej, szczególnie w warunkach zginania, brak jest informacji jakiej orientacji próbki odpowiada przedstawiona zależność.
- f) Drobne niekonsekwencje w układzie treści pracy: w części przeglądowej można odnaleźć fragmenty odnoszące się już do jej celu i założeń, choć te nie zostały jeszcze przedstawione (np. s. 12, s. 41). Z kolei w dalszych jej fragmentach (np. rozdział 3) wciąż kontynuowane są rozważania mające charakter przeglądu literatury.
- g) Zgodnie z jedną z przyjętych w rozdziale 2 hipotez badawczych „*Krzywą dynamicznego ściskania, stanowiącą główną charakterystyką mechaniczną materiału opakowaniowego piankowego o zamkniętych komórkach, można wyznaczyć wykorzystując krzywe amortyzacji lub na podstawie prób swobodnego spadku*”. W hipotezie tej można dopatrzeć się pewnych niekonsekwencji:
- (i) Zostały w niej wymienione w sposób równorzędny - co też powtórzono we wnioskach końcowych - dwie metody wyznaczania dynamicznej krzywej ściskania, tj. metoda „*wykorzystująca krzywe amortyzacji*” i metoda „*prób swobodnego spadku*”. Trudno zrozumieć, dlaczego pierwsza z nich została w ogóle wspomniana, skoro w dalszej części pracy nigdzie nie próbowano jej zastosować. Jest to tym bardziej dziwne, że już we wcześniejszym paragrafie (punkt 2.1) odnaleźć można stwierdzenie: „... zbiory krzywych amortyzacji nie nadają się do zastosowania w analitycznych modelach zderzeń ciał

niesprężystych, ani w modelach numerycznych opartych na metodzie elementów skończonych”.

- (ii) Został w niej wymieniony jedynie materiał piankowy o zamkniętych komórkach. Natomiast w dalszej części rozprawy zaproponowaną metodykę wyznaczania dynamicznej krzywej ściskania zweryfikowano także dla tektury falistej, co też we wnioskach końcowych przywołane zostało w celu poparcia postawionej hipotezy.
- h) Str. 57, rys. 4.1 – Schemat testera zderzeń zbyt mały i niewyraźny, biorąc pod uwagę, że jest to podstawowe, samodzielnie zbudowane stanowisko badawcze. Brak jest całościowego zdjęcia tego stanowiska, choć pokazano mniej istotne zdjęcia jego składowych, standardowych komponentów, tj. kamery szybkostrzelnej (rys. 4.3) i akcelerometru (rys. 4.9)
- i) W niektórych stwierdzeniach Dyplomant przejawia tendencję do zbytcej asekuracyjności, np. „Z przeprowadzonych badań wynika, że dokładniejszą metodą powinno być...” (s. 58), „... lepszym rozwiązaniem powinno być zastosowanie krzywych ...” (s. 49).
- j) Str. 58 – Jeśli stosowany rejestrator przyspieszenia filtrował i przez to zaniżał stabilne wartości przyspieszenia, to skąd pewność, że nie zredukował pików przyspieszeń podczas zderzeń.
- k) Str. 75 – konkluzje w Tabeli 4.5 co do poprawności modelu nie zgadzają się z podanymi kryteriami. Jest to być może wynikiem błędnego zapisu $b_w > \varepsilon_r$ (zamiast $b_w < \varepsilon_r$), co można potraktować jako potknięcie edytorskie.
- l) Str. 78 – 79: chociaż pośrednio można to wywnioskować z tabeli 4.8, to jednak podając wymiary badanego obciążnika (0,121x0,101x0,101 m - str. 78) w testach i symulacjach swobodnego spadku opakowania, pominięto istotną z punktu widzenia analizy wyników informację wzdłuż którego kierunku ustawiony był większy wymiar.
- m) Str. 81 – 82, Tabele 4.9 – 4.11: zabrakło krytycznej dyskusji eksperymentalnych wyników uzyskanych z prób swobodnego spadku opakowania, a w szczególności próby wyjaśnienia następujących obserwacji:
- (i) na kierunku x przyspieszenie było systematycznie wyższe niż na kierunku z, pomimo, że na tym ostatnim występowała zarówno pianka o mniejszej grubości jak i mniejsza jej powierzchnia oddziaływania na obciążnik.
- (ii) wystąpiły znaczne różnice przyspieszeń na kierunku x i y, mimo teoretycznie zbliżonych warunków zderzenia (takie same grubości pianki i powierzchnie ich kontaktu z obciążnikiem).
- n) W symulacjach zderzeń (p. 4.4.3) przyjęto prędkość zderzenia wynikającą z zależności teoretycznej (4.1). W rzeczywistości należy oczekiwać redukcji tej prędkości nawet w stopniu większym, niż w próbach z użyciem bijaka, ze względu na większe gabaryty opakowania, co jednak w tym przypadku nie zostało uwzględnione.

- o) W procedurze oceny/weryfikacji opracowanych modeli zderzeń przyjmowano różne wartości tolerancji błędu, tj.: $\varepsilon_r=5\%$ - w symulacjach spadku bijaka (p. 4.4.4) oraz $\varepsilon_r=10\%$ - w symulacjach swobodnego spadku opakowania. Jest oczywiste, że przy opisie zjawisk bardziej złożonych wyniki modelu teoretycznego mogą wykazywać większą rozbieżność z danymi eksperymentalnymi. W związku z tym, w drugim z wymienionych przypadków, dziesięcioprocentowy błąd tolerancji uznać należy za wartość jak najbardziej zadowalającą. Nie mniej jednak, odnosząc się do samego toku przedstawionego wywodu, arbitralne przyjmowanie a priori takiej akurat wartości tolerancji błędu, która umożliwi pozytywną weryfikację modelu, sprawia wrażenie działania pod z góry przyjętą tezę.
- p) Str. 88 – w przypadku zbioru wartości współczynników determinacji, wynoszących m.in. 0.84, 0.86, 0.87, itp., uogólnienie $R^2 \cong 1.0$ jest zbyt optymistyczne.
- q) Str. 88 – niezrozumiała konkluzja: *„Biorąc pod uwagę rozbieżności wyników badań doświadczalnych i teoretycznych można uznać, że możemy zaprojektować opakowanie, które będzie łagodzić skutki zderzenia z przeszkodą do ściśle określonego poziomu”*.
- r) Rozdział 5 – nazywanie próbki o przekroju trapezowym „próbką uzebrowaną” jest mylące. Termin ten (z ang. *ribbed foam*) stosuje się do arkuszy pianek o sekwencyjnie zmiennej grubości; fragment o przekroju trapezowym stanowi w tym przypadku zaledwie pojedyncze żebro.
- s) Str. 106 – rys. 5.14 przedstawia rozkład naprężenia średniego w próbkach prostopadłościennych i trapezowych. Niezrozumiałą jest powód dla którego Autor wykorzystał akurat rozkłady naprężenia średniego do interpretacji obserwowanych odkształceń (tj. skrócenia) pianki, tym bardziej, że przyjęcie liczny Poissona równej 0 (str. 39) implikuje zależność tego skrócenia jedynie od składowej naprężenia normalnego zgodnej z kierunkiem tego skrócenia.
- t) Str. 60, rów. (4.3) – konflikt oznaczeń: ν - prędkość/liczba Poissona. Str. 78 – zbyt lakoniczny tytuł podrozdziału: „Kompletne opakowania”.

Poza tym w pracy można natknąć się tu i ówdzie na drobne błędy edycyjne, bądź uchybienia stylistyczne, nie mające jednak istotnego wpływu na jej wartość.

4. Wniosek końcowy

Z przedstawionej w punktach od 1-2 oceny rozprawy doktorskiej wynika, że podjęty w niej temat, o istotnym znaczeniu poznawczym i praktycznym, został zrealizowany przez Doktoranta, pomimo pewnych uwag krytycznych, na odpowiednio wysokim poziomie. Rozprawa prezentuje oryginalne osiągnięcie Doktoranta, jakim jest opracowanie metodyki wyznaczania dynamicznej krzywej ściskania dla materiałów przeciwwstrząsowych stosowanych jako wypełnienia opakowań. Jej wiarygodność została potwierdzona dla dwóch, zasadniczo różnych rodzajów materiałów i różnych opisanych wyżej warunków zderzeń.

Przedstawiona wyżej ocena pozwala na stwierdzenie, że rozprawa doktorska mgra inż. Przemysława Osowskiego spełnia wymogi określone ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i w związku z tym wnioskuję o jej dopuszczenia do publicznej obrony przed Radą Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno – Przyrodniczego w Bydgoszczy.



Dr hab. inż. Tomasz Machniewicz