

Dr hab. inż. Roman Barczewski
Politechnika Poznańska
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Instytut Mechaniki Stosowanej

Poznań 30.11.2018 r.

Recenzja pracy doktorskiej
mgr. inż. Michała Rutkowskiego
pt. „Badania empiryczne i modelowanie właściwości akustycznych struktur granulowanych
znajdujących się w przestrzeni z podciśnieniem”

Promotor dr hab. inż. Robert Zalewski, prof. PW
Promotor pomocniczy dr inż. Piotr Deuzkiewicz
Politechnika Warszawska Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

Podstawą do wykonania recenzji było pismo dziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej SiMR-29/32/2018 z dnia 28.09.2018 r. i uchwała Rady Wydziału SiMR PW z dnia 20.06.2018 r.

1. Wstęp

Prace badawcze podjęte w ramach recenzowanej rozprawy związane są w głównej mierze z obszarem akustyki i dotyczą poszukiwań nowych materiałów mogących znaleźć zastosowanie jako ustroje absorbujące dźwięk lub posłużyć do tworzenia przegród dźwiękochłonnych. Mając powyższe na uwadze, szczególnie interesująca jest grupa tzw. materiałów lub struktur inteligentnych (ang. *smart material*, *smart structures*), która pod wpływem zewnętrznego czynnika/bodźca oprócz zmiany swoich właściwości fizycznych zmienia również właściwości akustyczne. W odróżnieniu od konwencjonalnych materiałów pochłaniających dźwięk, materiały i struktury typu *smart* otwierają nowe możliwości m.in. sterowania parametrami akustycznymi szeroko rozumianego środowiska.

Tematyka recenzowanej rozprawy wpisuje się w obszar poszukiwań nowych struktur adaptowalnych pod względem właściwości akustycznych. Autor zaproponował w tym aspekcie zastosowanie ustrojów zawierających granulaty tworzywa sztucznego znajdujący się w ograniczonej przestrzeni z podciśnieniem, definiowanych jako specjalne struktury granulowane (SSG). Parametrem pozwalającym na sterowanie właściwościami SSG jest podciśnienie w zamkniętej przestrzeni z granulatem, odizolowanej od otoczenia (obszaru o ciśnieniu atmosferycznym) cienką nieprzepuszczalną powłoką. Zwiększenie podciśnienia powoduje solidyfikację materiału granulowanego i zmianę jego właściwości fizycznych. Przeprowadzone w ramach rozprawy wielowariantowe badania eksperymentalne były podstawą do określenia zmian właściwości zarówno mechanicznych i akustycznych specjalnych struktur granulowanych wraz ze zmianą podciśnienia wewnątrz badanych próbek.

Autor podjął próbę modelowania właściwości akustycznych SSG. Wykorzystał w tym celu poddany modyfikacji model Woroniny. Modyfikacja polegała na dodaniu do równań parametru sterującego powiązanego z podciśnieniem i uwzględnieniu wpływu podciśnienia na

zmianę struktury wewnętrznej konglomeratu granulowanego. Weryfikację zaproponowanego modelu oparto na porównaniu wyników uzyskanych z symulacji i eksperymentu.

Mając powyższe na względzie można stwierdzić, że problem badawczy podjęty w pracy jest trafny, a zaproponowane podejście do jego rozwiązania jest w dużej mierze nowatorskie i oryginalne.

2. Ocena poprawności oraz kompletności celów i hipotez badawczych

Na podstawie przeglądu literaturowego przeprowadzonego w dwóch pierwszych rozdziałach rozprawy Autor wskazuje, że duże zainteresowanie zastosowaniem materiałów typu *smart* obejmuje głównie obszar elektroniki, mechaniki, budowy maszyn i inżynierii lądowej, natomiast mniejszym stopniu dotyczy ono akustyki. Ten fakt motywuje go do podjęcia prac w tej tematyce.

Autor stwierdza, że specyficzne właściwości specjalnych struktur granulowanych lokują je w grupie materiałów adaptowalnych, co daje potencjalną możliwość zastosowania ich do budowy warstwowych przegród dźwiękowych o zmiennej charakterystyce.

Mając to na uwadze w rozdziale 3 zostaje określony nadrzędny cel pracy, którym było *zbadanie podstawowych właściwości wytrzymałościowych i akustycznych SSG* oraz wynikające z niego cele pośrednie:

- określenie wpływu czynnika sterującego (podciśnienia) na podstawowe parametry akustyczne,
- przeprowadzenie badań wytrzymałościowych, które umożliwiają wykazanie mechanizmu zmian struktury granulowanej wynikającej z obniżania ciśnienia,
- sprawdzenie możliwości zastosowania SSG jako pojedynczej lub warstwowej przegrody akustycznej o zmiennych właściwościach,
- adaptacja i dostrojenie modelu opisującego właściwości akustyczne materiałów sypkich (model Woroniny) do opisu cech materiałów granulowanych w warunkach częściowej próżni.

Można stwierdzić, że cele pracy zostały jasno i precyzyjnie określone, a ich realizacja będzie pomocna w udowodnieniu tezy pracy.

W rozdziale 3.4 Autor formułuje dwie tezy badawcze.

- *Możliwym jest sterowanie właściwościami akustycznymi struktury zbudowanej z pakowanych próżniowo granulatów za pomocą zmiany parametru podciśnienia wygenerowanego we wnętrzu struktury*
- *Istnieje możliwość opisu charakterystyk akustycznych konglomeratów zbudowanych z granulatów umieszczonych w zamkniętej przestrzeni z podciśnieniem za pomocą zmodyfikowanego modelu Woroniny.*

Tak sformułowane tezy determinują dwa główne nurty pracy związane z badaniami empirycznymi i modelowaniem właściwości akustycznych struktur granulowanych znajdujących się w przestrzeni z podciśnieniem. Są one komplementarne i dobrze ujmują całość zagadnień zawartych w tytule pracy. Zamieszczone w rozprawie wyniki badań i symulacji dały odpowiedź w jakim stopniu możliwe było potwierdzenie/udowodnienie tak sformułowanych tezy, z drugiej strony pozwoliły określić przesłanki do dalszych prac badawczych w tej tematyce.

3. Analiza rozprawy

Recenzowana rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów, bibliografii, spisu treści, wykazu oznaczeń, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz sześciu załączników zawierających wyniki badań eksperymentalnych i symulacji.

Rozprawa łącznie z załącznikami zawiera 216 stron. W części zasadniczej pracy zamieszczono 153 rysunki i 23 tabele, które w zdecydowanej większości (128 rysunków i 22 tabele) zawierają wyniki własnych badań. Załączniki zawierają 222 rysunki stanowiące reprezentatywny zestaw wyników eksperymentów, modelowania oraz analiz porównawczych.

Bibliografia obejmuje 137 pozycji (w tym jedną publikację samodzielną Autora i 4 współautorskie) dobrze powiązanych z tematyką pracy. Autor powołuje się na prace źródłowe dla tego obszaru zagadnień (np. praca Kirchoffa z 1868 r.), uwzględnia także doniesienia z ostatnich 5 lat, które stanowią ok 7 % cytowanych pozycji literaturowych.

We wprowadzeniu (rozdział 1) Autor charakteryzuje materiały i struktury inteligentne, zarysowuje obszary ich zastosowań oraz zamieszcza przykładową klasyfikację. Rozdział zawiera opis cech wybranych materiałów takich jak: ciecze elektoreologiczne, ciecze i elastomery magnetoreologiczne, piezoelektryki oraz specjalne struktury granulowane. Zauważa, że w odniesieniu do tych ostatnich celowe jest prowadzenie prac badawczych oraz podejmowanie prób ukierunkowanych na stosowanie (SSG) w obszarze akustyki. m.in. z uwagi na to, że jest to materiał innowacyjny mogący konkurować z obecnie stosowanymi materiałami inteligentnymi. Autor konkluduje, że specyficzne właściwości takiej struktury granulowanej są przesłankami, aby w przyszłości stosować ten typ materiału np. do konstrukcji przegród dźwiękowych o zmiennej, sterowalnej charakterystyce.

W rozdziale 2 Autor zawęża rozpatrywanie ośrodków sypkich do struktur granulowanych znajdujących się w przestrzeni z podciśnieniem. Zostały tu opisane zjawiska występujące w tych materiałach m.in. solidyfikacja zachodząca pod wpływem podciśnienia, która powoduje zmianę struktury konglomeratu i jego właściwości. W ramach niniejszej pracy rozpatrywane są SSG oparte na granulacie wykonanym z termoplastycznych tworzyw sztucznych. Oprócz zalet takiego rozwiązania jak: niska cena, dostępność surowców, niewielka wrażliwość na czynniki zewnętrzne oraz odporność na zużycie wskazano również pewne ograniczenia. Zostały przedstawione niektóre cechy SSG jak: pamięć lub zdolność do odwzorowania kształtu, możliwość sterowania kształtem, morfowanie struktury - dające możliwość poruszania się obiektom zbudowanym z tych materiałów, tłumienie drgań oraz zilustrowano wynikające z tych cech przykładowe zastosowania.

W kolejnym trzecim rozdziale zostały określone cele pracy, sformułowane dwie tezy badawcze (opisane w punkcie 2 recenzji) oraz zarysowano zakres pracy.

Czwarty rozdział poświęcony jest modelom akustycznym. Zostały tu przedstawione podstawowe pojęcia i definicje z zakresu akustyki wykorzystywane w pracy takie jak: impedancja, rezystancja, reaktancja, współczynnik odbicia, współczynnik pochłaniania dźwięku oraz podstawowe pojęcia i definicje parametrów dotyczące struktury materiałów badanych pod względem akustycznym m.in.: porowatość (*open porosity*), krętość mikrostruktury (*tortuosity*), liczby podobieństwa (*characteristic numbers*). Pokazano przykłady uproszczeń w modelowaniu materiału: gąbczastego, włóknistego i granulowanego stosowanych do budowy przegród akustycznych, Autor dodaje, że rozpatrywane modele akustyczne, w postaci formuł matematycznych, tworzone są w celu uzyskania możliwie dokładnego opisu i dają możliwość analizowania zachowania materiałów porowatych w ujęciu akustycznym. Sprowadza się to głównie do określenia impedancji zespolonej i stałej propagacji fali dających w miarę pełną wiedzę na ten temat.

W dalszej części rozdziału zamieszczono przegląd różnych rodzajów modeli akustycznych: analityczne, empiryczne, fenomenologiczne. Zostały one zaprezentowane w sposób sygnalny, skupiając się na założeniach i uwarunkowaniach ich stosowania. Przytaczając wzory zastosowano ich oryginalną notację zaczerpniętą z literatury źródłowej. Więcej uwagi poświęcono na opis modelu Woroniny i parametrów z nim powiązanych. Prezentowane równania umożliwiają modelowanie struktur granulowanych głównie w zakresie niskich i średnich częstotliwości. Autor sygnalizuje, że po pewnych modyfikacjach mogą one posłużyć do opisu właściwości akustycznych granulatów pakowanych próżniowo. Za stosowaniem tego modelu przemawia to, że bazuje on na łatwo mierzalnych charakterystykach i parametrach związanych z cechami materiałów granulowanych i pozwala na dość dokładny opis cech akustycznych materiałów oraz umożliwia prowadzenie symulacji ukierunkowanych na zastosowania techniczne.

Zasadniczymi rozdziałami opiniowanej pracy są rozdziały piąty i szósty. Rozdział piąty dotyczy badań właściwości mechanicznych struktur granulowanych umieszczonych w przestrzeni z podciśnieniem. Autor określił cel badań, którym było oszacowanie wpływu określonych w planie badań czynników na parametry wytrzymałościowe SSG oraz pozyskanie danych umożliwiających modelowanie struktur. W ramach badań wyznaczano wartości modułu sprężystości podłużnej E (moduł Younga) oraz umowne granice plastyczności k dla próbek walcowych, których budowę przedstawiono na rysunku 5.1. Plan badań zakładał zbadanie wpływu na te wielkości czynników takich jak: rodzaj materiału granulowanego (PS, PP, ABS, PMMA), średnica próbki (35, 55, 75, 95 i 115 mm – badanie efektu skali), wartość podciśnienia wewnątrz próbki (0 – 0,09 z krokiem 0,01 MPa) oraz prędkość liniowa odkształcania (0,5, 7 i 50 mm/s). W rozdziale zaprezentowano wyniki badań oraz i ich analizę wyłącznie dla próbek z granulatem polistyrenowymi. Autor sformułował wnioski pozwalające na potwierdzenie tezy dotyczącej możliwości sterowania właściwościami mechanicznymi struktury granulowanej poprzez zmianę podciśnienia. Określił w jakim stopniu pozostałe czynniki uwzględnione w planie eksperymentu wpływają na moduł Younga oraz umowną granicę plastyczności k . Dobierając funkcje aproksymujące wyniki eksperymentów, określono charakter zależności $E(p)$ oraz $k(p)$.

Badaniom akustycznym został poświęcony rozdział szósty. Na wstępie dokonano przeglądu materiałów i struktur (w tym rozwiązań innowacyjnych) absorbujących dźwięk stosowanych do redukcji hałasu. W dalszej części zaprezentowano metodykę badań. Zakres badań ograniczono do wyznaczania charakterystyk współczynników pochłaniania w funkcji częstotliwości dla różnych wariantów i parametrów ujętych w planie badań przedstawionym na rysunku 6.1. Dokonano wyboru metody wyznaczania współczynnika pochłaniania oraz opisano zestaw aparatury i wyposażenia wykorzystywany w badaniach. Na rysunku 6.4 pokazano schematycznie budowę próbki do badań akustycznych. Autor arbitralnie określa średnicę próbek, zakres częstotliwościowy prowadzonych badań od 500 do 6400 Hz. W dalszej części rozdziału zostały zamieszczone wyniki i wnioski dotyczące: wpływu parametrów i czynników (określonych w planie badań) na charakterystyki dotyczące współczynników pochłaniania. Rozpatrywano wpływ: podciśnienia wewnątrz próbki, grubości przegrody czołowej, rodzaju tworzywa granulatu, rozmiaru próbki (badanie efektu skali) oraz badano powtarzalność uzyskiwanych wyników (trzy serie pomiarowe). W podrozdziale 6.7 zamieszczono wybrane, reprezentatywne wyniki badań. Rozdział szósty kończą wnioski o charakterze ogólnym.

Rozdział siódmy związany jest z opisem modyfikacji modelu Woroniny prowadzonych w celu dostosowania go do opisu właściwości akustycznych specjalnych struktur granulowanych i analizowaniu wpływu podciśnienia wewnątrz próbek. Autor podjął próbę adaptacji modelu (w warunkach ciśnienia atmosferycznego) i dopasowania/kalibracji (przy zadanym podciśnieniu wewnętrznym). Autor zaproponował wprowadzenie do modelu

parametru sterującego, umożliwiającego symulację zmian struktury wywoływanej zmianą podciśnienia wewnątrz próbki SSG. Zdefiniował i wprowadził do modelu krętość zastępczą mikrostruktury porów materiału zależną m.in. od podciśnienia. W rozdziale tym porównywano charakterystyki $\alpha(f)$ (współczynnik pochłaniania dźwięku w funkcji częstotliwości) uzyskiwane na drodze eksperymentalnej i symulacji (na podstawie modelu) dla próbek z granulatem ABS i PMMA i podciśnień od 0,01 do 0,09 MPa oraz różnej grubości powłoki czołowej próbek. Uzyskane wyniki były podstawą do sformułowania wniosków z przeprowadzonych prób.

W ostatnim rozdziale Autor dokonuje podsumowania oraz formułuje wnioski końcowe. Zostały tam zawarte pewne sugestie dotyczące budowy przegrody akustycznej opartej na SSG oraz przesłanki do dalszych prac w tej tematyce.

Rozprawa zawiera 6 załączników z wynikami badań eksperymentalnych i modelowania.

4. Ocena pracy pod względem wiedzy teoretycznej i stosowanych metod badawczych

Autor w ramach rozprawy podjął się wielowątkowego i dość ambitnego zadania badawczego. Przegląd literaturowy dotyczący zarówno materiałów i struktur typu *smart* oraz modeli akustycznych świadczy o dobrym rozeznaniu tematyki w tych obszarach. Stanowił on punkt wyjścia do formułowania tez pracy dotyczących badań empirycznych i modelowania struktur adaptowalnych akustycznie, w tym przypadku SSG. Praca jest dość dobrze umocowana teoretycznie. Autor swobodnie i umiejętnie przeplata własne przemyślenia z doniesieniami literaturowymi. Materiał ilustracyjny jest na ogół dobrze dobrany, choć niektóre rysunki i tabele zamieszczone w tekście głównym mogły być zamieszczone w załącznikach. Zamiast nich bardziej informatywne byłyby rysunki syntetyzujące wyniki badań, na podstawie których łatwiej formułować wnioski i spostrzeżenia. Na szczególne podkreślenie zasługują walory poznawcze rysunków w formie 3D dotyczące badań wytrzymałościowych próbek SSG oraz niektóre rysunki zawierające zestawienia porównawcze. Autor przygotował wielowariantowy, szczegółowy i obszerny plan badań eksperymentalnych, który konsekwentnie realizował. Reprezentatywne wyniki badań zostały zamieszczone w tekście głównym i załącznikach. W sposób syntetyczny została zaprezentowana metodyka badań wytrzymałościowych. Dokładniej opisano prowadzenie badań akustycznych. Przyjęte metody badań świadczą o dobrym opanowaniu warsztatu badawczego. Rozprawa jest wartościowym opracowaniem zawierającym oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego o dużych walorach poznawczych.

Uwagi, sugestie i spostrzeżenia, które nasuwają podczas czytania rozprawy mają raczej charakter polemiczny.

1. Autor proponuje zaliczyć innowacyjny materiał (SSG) do grupy materiałów/struktur inteligentnych (s.15 w.7; s.149 w.24). W kontekście podjętej tematyki badawczej warto rozważyć, aby w dalszych pracach nazywać je *strukturami akustycznie adaptowalnymi*. Granulaty w przestrzeni bez celowo wprowadzonej zmiany parametru czynnika sterującego (podciśnienia) raczej nie mają zdolności do autoadaptacji (cecha materiałów w pełni inteligentnych). Nie zmieniają swoich właściwości mechanicznych i akustycznych samoistnie np. zależnie od zmian poziomu dźwięku.
2. Analizując drugą tezę (rozd. 3.4 s.28) rodzi się pytanie co do trafności zawartego w niej sformułowania. Czy faktycznie model Woroniny był w pracy wykorzystywany do „opisu charakterystyk akustycznych” SSG czy raczej do ich tworzenia lub uzyskiwania na drodze symulacji, jak to pokazano w rozdziale 7 (rys. 7.15–7.32).

3. W rozdziale 5.1 (s. 64) zawarto informację o włączeniu do planu badań wytrzymałościowych różnych rodzajów i wariantów obciążeń. Interesujące byłoby podanie wyników takich prób np. o ile różniły się moduły Younga wyznaczone w próbie jednoosiowego rozciągania i ściskania próbek. Z kontekstu oraz opisu rysunku 5.2 można wnioskować, że wyniki prezentowane w dalszej części rozdziału 5 dotyczą jednoosiowego rozciągania. Rodzą się tutaj pewne pytania. Na czym polegało i jak realizowano tzw. wstępne ściśnięcie? Autor stwierdza, że największe siły podczas tego typu odkształceń (rozciąganie próbki) związane są ze zmianami w strukturze materiału granulowanego (poślizg, obrót ziaren, przemieszczenia). Czy podjęto próbę weryfikacji tej hipotezy? Celowym wydaje się sprawdzenie jaki jest wpływ obudowy PCV na wyniki próby, np. wyznaczając E dla obudowy z PCV (z zadaniem podciśnieniem) pustej lub wypełnionej kuleczkami stalowymi o średnicach zbliżonych do rozmiaru ziaren granulatu tworzywa sztucznego (aby zapobiec deformacji obudowy).
4. Analizując postać wyników przedstawionych na rysunku 5.2 (s. 66) można zauważyć pewną cykliczność zmian naprężeń podczas próby jednoosiowego rozciągania próbek SSG. Z czego, zdaniem Autora, to wynikało?
5. W rozdziale 5.4 (s. 91) Autor stwierdza, że wzrost podciśnienia powoduje nieliniowy wzrost parametrów E i k , przy czym zależności te są różne. Do aproksymacji wyników badań dotyczących modułu Younga Autor zaproponował funkcję wykładniczą, a dla umownej granicy plastyczności funkcję Gompertza. Nasuwa się w związku z tym kilka pytań. W jaki sposób badano dopasowanie tych funkcji do danych eksperymentalnych? Jaka miarę lub kryterium zastosowano? Czy badano pod tym względem inne funkcje aproksymujące?
6. Na stronie 101 opisano, że możliwe jest wyznaczanie współczynnika pochłaniania w różnych zakresach częstotliwości, zależnie od długości i średnicy rury impedancyjnej. Wstępne badania akustyczne prowadzono w dwóch zakresach 50–1600 Hz i 500–6400 Hz. Natomiast badania zasadnicze były prowadzone wyłącznie w tym wyższym paśmie. Czym podyktowany był taki wybór? Jak wykazano, model Woroniny poprawnie opisuje zakres niskich i średnich częstotliwości do 100 Hz do ok. 3,5 kHz (patrz rys. 4.13). Ograniczając pasmo pominięto informatywną część charakterystyki opisującej zmianę współczynnika pochłaniania w funkcji częstotliwości. W dużym stopniu ogranicza to możliwości porównania wyników eksperymentu z modelem akustycznym rozpatrywanej struktury. Porównania były zatem możliwe jedynie w paśmie od 500 Hz do 3200 Hz. Mając powyższe na uwadze optymalne byłoby prowadzenie zarówno badań empirycznych i modelowania w tym samym zakresie częstotliwości np. 100–3200 Hz. W pracy wykazano (s. 101 w.21), że taki dobór pasma jest technicznie realizowalny i pokrywa się z jednym z możliwych do wyboru.
7. W rozdziale 6.3 Autor wyznacza charakterystyki dotyczące współczynnika pochłaniania dźwięku, natomiast formułuje wnioski operując pojęciem „przewodności dźwięku” (s. 107) lub „przewodności akustycznej” (s. 108 w.8). Jaka w tym kontekście jest definicja tych pojęć.
8. Na stronie 107 autor stwierdza, że największe zmiany właściwości akustycznych (współczynnika pochłaniania dźwięku) SSG zachodzą w zakresie zmian podciśnienia pomiędzy 0 a 0,03 MPa. Rodzi się pytanie, dlaczego ten zakres nie został przebadany szczegółowo? O zasadności takich badań świadczą wyniki badań zamieszczone na rysunkach 6.10 i 6.11. Dla podciśnień powyżej 0,03 MPa nie są praktycznie obserwowane zmiany charakterystyk. Wynika z tego, że zakres podciśnień i krok zmian przyjęty w planie badań praktycznie nie pozwalał uchwycić istotnych zmian

- właściwości akustycznych zachodzących w zakresie podciśnień do 0,02 MPa. W oparciu o prezentowane w pracy wyniki można by formułować wniosek, że zmiana właściwości akustycznych następuje prawie skokowo, a zmiana następuje po zadaniu podciśnienia rzędu 0,01–0,02 MPa (sterowanie dwustanowe). Jeszcze wyraźniej widać ten efekt na rysunkach Z.3.1–Z.3.40 zamieszczonych w załączniku.
9. W rozdziale 6.4 (s.110 ust.2) zawarto konkluzję: „(...) *zauważalne jest, że przepuszczalność i grubość powłoki próbki w części przedniej (...) zmienia możliwości absorpcyjne*”. Takie sformułowanie sugeruje, że powłoka w części przedniej nie jest szczelna. Jaki był stan faktyczny?
 10. W rozdziale 6.5 (s.113 w.13) Autor stwierdza, że w przypadku próbki 1 „(...) *upakowane próżniowo granulaty polistyrenu wydają się wykazywać najlepsze właściwości akustyczne*”. Jakie przyjęto mierzalne kryterium do sformułowania takiego wniosku. Nie wynika to jednoznacznie z porównań charakterystyk przedstawionych na rysunku 6.16. Wszystkie prezentowane w tym rozdziale wyniki uzyskano dla ciśnienia atmosferycznego (bez podciśnienia), zatem również trudno w tym przypadku mówić tu o badaniu granulatu upakowanym próżniowo.
 11. Tytuł rozdziału 6.7 nie jest adekwatny do jego zawartości. Został on zatytułowany „*Analiza wyników badań akustycznych*”. Zamieszczono w nim 14 charakterystyk (rys. 6.22 – 6.37) oraz 5 tabel, lecz nie zawiera jakiegokolwiek analizy prezentowanych w tym rozdziale wyników badań. Szczegółowej analizy prezentowanych wyników nie zawarto również w następnym rozdziale 6.8 „*Wnioski ogólne*”. Zawarto tu jedynie dość ogólny wniosek (s.127 w.3) „*Zmiany rejestrowanych charakterystyk towarzyszące różnym stopniom częściowej próżni we wnętrzu SSG są bardzo wyraźne i występują dla wszystkich badanych materiałów.*”
 12. W rozdziale 6.4 badanie wpływu grubości powłoki przedniej próbki na charakterystyki akustyczne prowadzono jedynie dla ciśnienia otoczenia (podciśnienie 0 MPa). Z czego wynikało to zawężenie badań. Rodzi się pytanie, czy w przypadku zaistnienia podciśnienia we wnętrzu próbki obserwowano zmianę faktury powierzchni przegrody (np. odwzorowanie się na elastycznej powierzchni czołowej próbki kształtu granulatu). Jeśli tak, to czy analizowano jaki mogło mieć to wpływ na współczynnik pochłaniania. Jeżeli występowała taka deformacja powierzchni czołowej przegrody to w jakim stopniu było to zależne od grubości powłoki. Czy po powrocie ciśnienia wewnątrz próbki do wartości ciśnienia atmosferycznego powierzchnia czołowa powracała do pierwotnej postaci czy też kształt granulatu utrzymała się na niej?
 13. Można zaobserwować pewien brak konsekwencji (spójności) w doborze prezentowanych wyników mogących być podstawą do porównań zmian właściwości mechanicznych i akustycznych SSG pod wpływem parametru sterującego (podciśnienia). W zasadniczej części pracy wyniki badań wytrzymałościowe dotyczą jedynie granulatu PS natomiast wyniki badań akustycznych ABS i PMMA.
 14. W rozdziale 7 porównano wyniki eksperymentu i modelowania (w oparciu o zmodyfikowany model Woroniny). O ile można się zgodzić z Autorem o zachodzeniu pewnej zgodności wyników eksperymentu z symulacjami przedstawionymi na rysunkach 7.15–7.32, to dla wyników zamieszczonych w załączniku 6 zgodność ta już nie jest tak oczywista. Jakość dopasowania byłaby lepiej widoczna, gdyby maksymalną wartość skali pionowej rysunków 7.15–7.32 przyjęto jako 0,25, a dla charakterystyk zamieszczonych w załączniku 6 wartość 0,1. Szkoda, że nie podjęto próby sparametryzowania jakości dopasowania.
 15. Można odczuwać pewien niedosyt, że operując w obszarze badań eksperymentalnych Autor nie podjął próby oszacowania niepewności pomiarowej uzyskiwanych wyników badań.

16. Na stronie 27 w celach pracy jedno z planowanych zamierzeń określono jako „sprawdzenie możliwości zastosowania badanych materiałów jako pojedynczej lub jednej z wielu powłok warstwowych przegrody akustycznej o zmiennych właściwościach”. W jakim stopniu to zamierzenie zrealizowano w ramach niniejszej pracy.
17. W rozdziale ósmym, na podstawie wniosków z prac eksperymentalnych i podjętych prób modelowania, Autor stwierdza, że tezy pracy zostały potwierdzone. Należy jednak zadać pytanie w jakim stopniu lub zakresie to się udało, tym bardziej, że treść tez sformułowanych na początku pracy (s.28) nieco się różni od udowodnionych zamieszczonych w podsumowaniu (s.150). Odpowiedź na to pytanie będzie z pewnością inspiracją do dalszych przemyśleń, prac i działań w tym bardzo ciekawym i obiecującym obszarze zagadnień związanych z akustyką.

Powyższe sugestie i uwagi mimo, iż mogą być przedmiotem dyskusji nie mają jednak istotnego wpływu na ocenę merytoryczną pracy.

5. Ocena formalnej strony rozprawy

Autorowi nie udało się uniknąć błędów i niedociągnięć edycyjnych. Do najważniejszych można zaliczyć niżej wymienione.

1. Na stronie 7 autor zamieścił „Spis skrótów”, jednakże w ujęciu formalnym jest to raczej wykaz akronimów i oznaczeń.
2. Spis oznaczeń zamieszczony na stronach 7–9 nie jest spójny. Brak ujednoczenia oznaczeń we wzorach w ramach rozprawy w znacznej mierze utrudnia jej lekturę. Te same zmienne, parametry w kolejnych rozdziałach mają różne oznaczenia. Dla rozdziału 4.2 oznaczeń tych nie zamieszczono.
3. Zastrzeżenia budzi stosowana notacja parametrów, zmiennych stosowana we wzorach, tekstach i na rysunkach w obrębie całej pracy (np. wzory i tekst na s.68). Powinna być ona ujednoczona co do kroju czcionki i zgodna z ogólnie przyjętymi zasadami np. stosowania pochyleń (kursywy) dla zmiennych itp.
4. Rozdział 6.6 dotyczy określenia wpływu objętości próbki na współczynnik pochłaniania (badanie efektu skali), a na stronie 116 (akapit 4 i 5) formułowane są wnioski dotyczące wpływu grubości przegrody”. Z opisu rysunków 6.16–6.21 wynika, że badania były prowadzone jednak dla jednej grubości powłoki przedniej 0,05 mm. Terminologię w tym zakresie zaproponowano na stronie 104 (*długość próbki* – akapit 1, *grubość przegrody* – akapit 4). Brak konsekwencji w jej stosowaniu powoduje tego typu niezgodności.
5. W zakresie pracy (rozdział 3.3) pominięto badania akustyczne. Były one prowadzone i raportowe w rozdziale 6.
6. Odnośnie układu pracy to początek rozdziału 6.1 (ok. 1,5 strony) mógłby znaleźć się we wstępie do pracy w rozdziale 1. Szczegółowe dane dotyczące parametrów i właściwości tworzyw sztucznych zawarte w rozdziale 2.3 mogły się znaleźć w rozdziale 5, gdzie opisano metodykę, plan badań oraz budowę próbek.
7. Pewne niedociągnięcia i błędy wystąpiły w materiale ilustracyjnym i tabelach:
 - poza nielicznymi wyjątkami na rysunkach zawierających legendę brakuje opisu wielkości i jednostek z nią związanych,
 - opisy rysunków 5.38–5.40, 5.43–5.45, 5.48–5.50 nie są kompletne, brakuje informacji o prędkości deformacji,
 - rysunki 5.61–5.64 mają taki sam opis jak 5.57–5.60, a ilustrują inne dane,

- rysunki 5.51 oraz 5.53–5.56 nie są kompletne; naniesiono na nich tylko jedną lub dwie z krzywe aproksymujące, brakuje pozostałych,
 - rysunek 5.15 – brak zgodności podpisu z jego zawartością (prawdopodobnie jest to kopia rys. 5.14); błędy numeracji (rys. 5.45), błędy w podpisach (rys. 7.22 i Z.2.45),
 - w podpisach rysunków 6.13–6.15 podano materiały odpowiednio: PP, PS i PMMA; nie jest jednoznaczne czego ten opis dotyczy: materiału granulatu czy materiału, z którego wykonano przegrodę czołową; w tekście (s. 110) Autor sugeruje, że na rysunkach tych „pokazano charakterystyki pochłaniania SGG w zależności od rodzaju materiału czołowego”, natomiast w planie eksperymentu (s. 105, rys. 6.6) uwzględniana jest jedynie zmiana grubości powłoki, a nie rodzaj materiału powłoki,
 - część wyników badań zamieszczonych w tabeli 5.1 dotyczących modułu Younga ma prawdopodobnie błędne wartości; wskazane byłoby również zweryfikowanie wartości w tabelach 5.6, 5.8 i 5.14.
 - w tabelach 5.3–5.8 oraz 5.13 i 5.14 nie podano jednostek dla danych w nich zawartych (dla E i k), ponadto w tabelach 5.8 i 5.14 w nagłówku dotyczącym opisu kolumn brakuje informacji o wielkości i jednostce.
8. Błędne powołania; przykładowo na stronie 69 powołano nieistniejące tabele 2 i 3.
 9. Opis bibliograficzny ma pewne niedociągnięcia: w czterech pracach brakuje nazwiska autora lub autorów, w przypadku dwóch autorów powoływane są prace opublikowane w tym samym roku (bez oznaczeń a, b) co utrudnia ich rozróżnienie. Jedna praca została dwukrotnie umieszczona w bibliografii. O ile dobrze zauważyłem, w tekście rozprawy nie zostały powołane trzy pozycje literaturowe zawarte w bibliografii (Guild i inni 2015, Ricciardi i inni 2002, oraz jedna ze stron internetowych).
 10. Szkoda, że rozdziale ósmym podsumowującym pracę, liczącym ponad 10 stron, nie pogrupowano wniosków w kategoriach np. ogólne, poznawcze i użyteczne oraz nie wyodrębniono przesłanek do dalszych prac. Taki układ pozwoliłaby usystematyzować podsumowanie i uniknąć powtórzeń pewnych fraz tekstu.

W pracy wystąpiły nieliczne błędy interpunkcyjne i tzw. "literówki". Można rozważyć dołączenie do rozprawy erraty. Dotyczy to głównie kompletności opisu zmiennych i parametrów w cytowanych wzorach, powołań literaturowych i danych bibliograficznych.

6. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę stwierdzam, że do szczególnych osiągnięć Autora można zaliczyć

- Zarysowanie i nowej grupy materiałów/struktur akustycznie adoptowalnych opartych na granulatach z tworzyw sztucznych znajdujących się w podatnej otulinie z podciśnieniem. Jest to rozwiązanie oryginalne i innowacyjne o dużym potencjale aplikacyjnym.
- Przeprowadzenie badań wybranych właściwości akustycznych cech mechanicznych SSG oraz określenie możliwości sterowania tymi właściwościami poprzez zmianę podciśnienia. Uzyskane w tym zakresie wyniki stanowią *novum* w sensie poznawczym.
- Podjęcie próby modelowania pod względem akustycznym specjalnych struktur granulowanych (dla różnych wartości podciśnienia).
- Utworzenie bogatej bazy danych i wyników eksperymentalnych będącą punktem wyjścia do dalszych badań w tej tematyce.

Zawarte w recenzji sugestie oraz uwagi – szczególnie te o charakterze polemicznym – powinny być inspiracją do dalszej eksploracji przez Autora tego nowego obszaru badawczego, zarówno pod względem rozważań teoretycznych, badań empirycznych, modelowania i symulacji oraz stać motywacją do poszukiwań zastosowań praktycznych.

Całość pracy **oceniam pozytywnie**, a sama rozprawa stanowi wartościowe dzieło. Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Rutkowskiego **spełnia wymagania określone** Ustawą o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki. Pozwala to sformułować wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony.

Roman Borowski