

dr hab. inż. Łukasz Jankowski, prof. IPPT PAN
Zakład Technologii Inteligentnych
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
ul. Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa
email: ljank@ippt.pan.pl

Warszawa, 11 czerwca 2023 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Piotra Fiborka
pt. „Modelling of sandwich plates and piezoelectric transducers to identify
the severity of mechanical damage”

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo nr RN-421-33/21 Pana dr. hab. inż. Grzegorza Żywicy, prof. IMP PAN, Dyrektora ds. naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk (IMP PAN) z dnia 13 kwietnia 2023 r. wraz z dołączoną do niego rozprawą doktorską Pana mgr. inż. Piotra Fiborka pt. „Modelling of sandwich plates and piezoelectric transducers to identify the severity of mechanical damage”.

Praca powstała w Zakładzie Mechaniki Struktur Inteligentnych Instytutu Maszyn Przepływowych PAN. Promotorem Doktoranta jest Pan dr hab. inż. Paweł Kudela, prof. IMP PAN. Większość prac przedstawionych w rozprawie została wykonana w ramach kierowanego przez Pana Piotra Fiborka projektu PRELUDIUM NCN pt. „Zastosowanie funkcji identyfikacji uszkodzenia wspomaganego modelowaniem numerycznym do monitorowania stanu technicznego konstrukcji kompozytowych w zmiennych warunkach otoczenia”.

2. Zasadność podjęcia tematu

Ogólny cel swojej pracy Doktorant formułuje następująco (Streszczenie):

...opracowanie wspomaganego modelem metody oceny uszkodzeń mechanicznych w płycie warstwowej z rdzeniem o strukturze plastra miodu,

natomiast celami szczegółowymi są (str. 11):

- *opracowanie efektywnego modelu numerycznego propagacji fal prowadzonych w płycie warstwowej z rdzeniem o strukturze plastra miodu z uwzględnieniem temperatury jako dodatkowego parametru;*
- *eksperymentalna walidacja modelu;*
- *wyznaczenie wspomaganego modelem wskaźnika uszkodzenia pozwalającego określić wpływ uszkodzenia na propagację fal prowadzonych;*
- *zbadanie wpływu temperatury otoczenia na opracowany wskaźnik;*
- *analiza wpływu różnych parametrów płyty na opracowany wskaźnik.*

Tezą rozprawy jest stwierdzenie (str. 12):

Wspomagana modelem analiza propagacji fal prowadzonych jest efektywnym narzędziem pozwalającym określić stopień uszkodzenia płyt warstwowych z rdzeniem o strukturze plastra miodu.

Cele i teza pracy zostały sformułowane poprawnie i precyzyjnie. Temat wpisuje się w ważny i intensywnie rozwijany obszar światowej nauki i techniki związany z nieniszczącymi metodami identyfikacji uszkodzeń elementów konstrukcyjnych (ang. nondestructive testing, NDT).

Podstawowym technicznym wyzwaniem w tym obszarze jest olbrzymi koszt obliczeniowy wiarygodnych symulacji numerycznych. W celu zmniejszenia tego kosztu większość publikowanych prac z tego zakresu wykorzystuje techniki homogenizacji metamateriałów. Takie jednak podejście, jak wykazuje w swojej rozprawie Doktorant, w wypadku metamateriałów ze złożoną strukturą wewnętrzną pozwala uzyskać wyniki akceptowalne w najlepszym razie jedynie jakościowo. Dlatego należy docenić oryginalność i poziom trudności podstawowego zadania, którego podjął się Doktorant, czyli opracowania efektywnego numerycznego modelu propagacji fal prowadzonych dla płyty kompozytowej o złożonej geometrii warstwy wewnętrznej.

Problem rozważany w rozprawie recenzent uważa więc za interesujący i aktualny. Jest on ważny zarówno z badawczego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Podjęcie tak określonej tematyki badań należy uznać za w pełni uzasadnione.

3. Zakres i treść rozprawy

Rozprawa jest sformułowana w języku angielskim. Jej główna część liczy 118 stron. Struktura rozprawy jest logiczna, przejrzysta i właściwie dobrana do prezentowanych treści. Zasadnicza jej część zawiera się w Rozdziałach 2–8, które są poprzedzone krótkimi streszczeniami w języku polskim i angielskim, wykazami symboli i skrótów oraz wprowadzeniem, a zakończone podsumowaniem, dwoma dodatkami o charakterze analityczno–technicznym i spisem literatury. Bibliografia liczy 118 pozycji. W tej liczbie znajduje się 20 artykułów autorów związanych ze środowiskiem badawczym Doktoranta (pracowników IMP PAN). Współautorstwa Doktoranta jest 7 artykułów zamieszczonych w bibliografii¹. Artykuły te opublikowane były w latach 2018–2022 w uznanych międzynarodowych czasopismach naukowych (*Composite Structures*, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, *Smart Materials and Structures* (3x), *Ultrasonics* i *Sensors*). Bieżące wartości wskaźników IF tych czasopism zawierają się w zakresie od 2.774 do 6.603 (średnia 4.240). Razem ze znaczącymi na tym etapie kariery naukowej wartościami wskaźników bibliometrycznych² taki dorobek publikacyjny pośrednio świadczy bardzo pozytywnie o jakości pracy badawczej Doktoranta.

Rozdział 1 rozprawy (*Introduction*) to – zgodnie z tytułem – zwięzłe, ogólne wprowadzenie do tematyki rozprawy. Doktorant charakteryzuje przedmiot rozprawy, tło literaturowe, motywację i wyzwania badawcze.

W krótkim, zaledwie dwustronicowym Rozdziale 2 (*Problem statement*) Doktorant podaje ogólne i szczegółowe cele rozprawy oraz jej tezę. Następnie charakteryzuje zakres pracy.

¹ W 3 z tych artykułów Pan Piotr Fiborek występuje jako autor pierwszy i korespondencyjny.

² Baza Scopus, czerwiec 2023: 123 cytowania bez autocytowań, indeks H = 7, 20 dokumentów.

Kolejny Rozdział 3 (*Concept of the method*) opisuje podstawowe założenia opracowanej metody symulacji numerycznej (sposób modelowania płyty i uwzględnienia zależności własności materiałowych od temperatury) oraz proponowanego wskaźnika rozmiaru uszkodzenia.

Numeryczny model płyty warstwowej został zbudowany z wykorzystaniem metody elementów spektralnych. Rozdział 4 (*Formulation of the time-domain spectral element method*) przedstawia podstawy tej metody, w tym opis elementów dwu- i trójwymiarowych, wyprowadzenia macierzy mas, sztywności i tłumienia, autorską metodę modelowania interfejsów pomiędzy elementami o niekompatybilnej siatce, model przetworników piezoelektrycznych, algorytm numerycznego całkowania równania ruchu oraz sposób efektywnego zrównoleglenia obliczeń z wykorzystaniem procesora graficznego (GPU).

W Rozdziale 5 (*Numerical simulation pre-processing and the convergence tests*) Doktorant opisuje szczegółowo numeryczny model konkretnej płyty wykorzystywanej w dalszej części pracy: jej geometrię, dwa sposoby modelowania (geometria pełna i – w celach porównawczych – homogenizowana), sygnał wymuszający, model uszkodzenia, siatki poszczególnych elementów płyty i przetworników. Rozdział zamykają testy rozdzielczości przestrzennej i czasowej opracowanej procedury symulacji, wykonane w celu zapewnienia numerycznej zbieżności wyników.

Eksperymentalna walidacja opracowanego modelu numerycznego opisana jest w Rozdziale 6 (*Experimental validation of the models*). Została ona przeprowadzona na trzy sposoby, to jest poprzez porównanie:

- 1) impedancji elektromechanicznej czujników piezoelektrycznych – zmierzonej eksperymentalnie, modelowanej analitycznie oraz symulowanej numerycznie;
- 2) pełnego pola prędkości symulowanego numerycznie i zmierzonego eksperymentalnie z wykorzystaniem lasera skanującego;
- 3) czasowego przebiegu odpowiedzi czujników zmierzonej eksperymentalnie i symulowanej numerycznie.

Rozdziały 7 i 8 poświęcone są zaproponowanemu w rozprawie wskaźnikowi intensywności uszkodzenia wspomaganiem opracowanym modelem numerycznym.

Rozdział 7 (*The severity of damage estimation*) proponuje sześć potencjalnie użytecznych sformułowań, z których każde może być wykorzystane na trzy sposoby (z modami A0 i S0 oraz całym odcinkiem czasowym) i przy trzech podstawowych częstotliwościach wymuszenia. Następnie model numeryczny jest wykorzystany w celu wyznaczenia zależności wartości tych wskaźników od rozmiaru uszkodzenia. Pozwoliło to wskazać dwa najbardziej odpowiednie wskaźniki, których wartości zależą od rozmiaru uszkodzenia w sposób monotoniczny. Następnie wyniki numeryczne są skonfrontowane z wynikami eksperymentalnymi.

Rozdział 8 (*Parametric study of guided wave propagation*) poświęcony jest testom wrażliwości wskaźników na temperaturę otoczenia oraz konfigurację płyty (jedna lub dwie warstwy ciągłe) oraz testom wrażliwości przebiegu odpowiedzi falowej na szereg geometrycznych parametrów płyty oraz parametrów przetworników piezoelektrycznych.

Rozdział 9 (*Summary*) podsumowuje rozprawę oraz przedstawia najważniejsze oryginalne osiągnięcia i potencjalne dalsze kierunki badań.

4. Merytoryczna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska Pana Piotra Fiborka poświęcona jest tematowi aktualnemu badawczo, oryginalnemu i o dużym znaczeniu aplikacyjnym. Doktorant poprawnie posługuje się metodyką prowadzenia badań naukowych w swojej dyscyplinie, to jest 1) rozpoczyna pracę od zarysowania szerokiej problematyki, wyzwań, uwarunkowań technicznych i dostępnych metod; następnie na tym tle 2) formułuje problem szczegółowy oraz 3) opisuje zaproponowaną technikę jego rozwiązania i specyficzny sposób jej implementacji. W kolejnych rozdziałach 4) przeprowadza numeryczne analizy użyteczności zaproponowanego narzędzia i 5) weryfikuje je wykorzystując dane eksperymentalne. Finalnie 6) przedstawia wnioski, podsumowuje oryginalne osiągnięcia i możliwe dalsze kierunki badań. Taki schemat badań, właściwie odzwierciedlony w strukturze rozprawy, pozytywnie świadczy o naukowej dojrzałości Doktoranta.

Tematyka rozprawy uzupełnia i dobrze wpisuje się w intensywnie rozwijany obszar światowej nauki związany z zagadnieniami nieniszczącego monitorowania stanu technicznego elementów konstrukcji inżynierskich oraz obliczeniowych aspektów propagacji fal prowadzonych w elementach o złożonej geometrii. Jako ważne, interesujące i istotnie oryginalne osiągnięcia rozprawy recenzent podkreśliłby przede wszystkim:

- Systematyczne opracowanie metody numerycznej symulacji propagacji fal prowadzonych w kompozytowych płytach warstwowych z rdzeniem o strukturze plastra miodu. Opracowana metoda jest istotnie efektywniejsza numerycznie niż metody dotychczasowe. Jako elementy składowe tego osiągnięcia należy wymienić opracowanie metody modelowania interfejsu pomiędzy elementami o niekompatybilnych siatkach i typach elementów, paralelizację obliczeń z wykorzystaniem GPU, uwzględnienie wpływu temperatury otoczenia oraz precyzyjną walidację z wykorzystaniem danych eksperymentalnych.
- Propozycję szeregu wskaźników mogących pełnić rolę wskaźników intensywności uszkodzenia (modelowanego w postaci odspojenia pomiędzy warstwą zewnętrzną płyty a rdzeniem). Zaproponowane wskaźniki zostały systematycznie zweryfikowane z wykorzystaniem danych w pierwszej kolejności numerycznych a następnie eksperymentalnych.
- Szczegółowa analiza wrażliwości wyznaczonych wskaźników na czynniki zewnętrzne (temperatura otoczenia) oraz testy ich użyteczności w innej konfiguracji płyty (dwie warstwy zewnętrzne zamiast jednej).

Bardzo pozytywne wrażenie robi duża systematyczność i precyzja prowadzonych badań oraz ewidentnie bardzo duży nakład pracy niezbędny w celu implementacji i weryfikacji skutecznego modelu obliczeniowego i zaproponowanych wskaźników. Efektywna implementacja opracowanej metody wymagała od Doktoranta wykazania się znaczącą sprawnością programistyczną.

5. Pytania i uwagi dyskusyjne

Recenzent nie zauważył w rozprawie żadnych większych błędów ani zaniedbań. Zasadniczo wszystkie istotne częściowe wyniki i narzędzia przedstawione w rozprawie przeszły już proces recenzji merytorycznej, ponieważ zostały opublikowane w szeregu artykułów naukowych, w tym trzech z Doktorantem w roli autora pierwszego i korespondencyjnego.

Przedstawione poniżej uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny. W zamierzeniu mają ewentualnie przyczynić się do zwiększenia przejrzystości i walorów poznawczych rozprawy.

- 1) Przedstawione wyniki są wartościowe i bardzo interesujące badawczo. Recenzentowi jednak nieco brakuje choćby krótkiej dyskusji potencjalnego scenariusza zastosowania praktycznego. Wartości zaproponowanych wskaźników uszkodzenia wydają się być bardzo zależne od konkretnej konfiguracji geometrycznej. Czy dla każdego zastosowania konieczna by była ponowna kalibracja modelu numerycznego? Jeśli tak, to czy kalibracja przeprowadzona dla elementu w stanie nieuszkodzonym byłaby wystarczająca?
- 2) W rozdziale 4.5 opisany jest model tłumienia. Jest to model tłumienia środowiskowego: macierz tłumienia jest proporcjonalna do macierzy mas. Doktorant wystarczająco uzasadnia taki wybór aspektami numerycznymi i powołaniem się na literaturę. Recenzentowi brakuje jednak konkretnej wartości współczynnika proporcjonalności: ile on wynosił i w jaki sposób był wyznaczony?
- 3) Rozdział 4.10 i Rysunek 4.6 ilustruje m.in. przyspieszenie obliczeń w stosunku do algorytmu benchmarkowego. Czy wartości referencyjne zostały otrzymane na tym samym komputerze, co zaproponowana metoda, czy też czas obliczeń został wzięty z literatury?
- 4) Rozdział 5.6 opisuje testy zbieżności opracowanego modelu numerycznego.
 - a. Nie jest do końca jasne, w jaki sposób wyliczany jest wskaźnik zaproponowany zależnością (5.2). Czy symbole e^{max} i e^p oznaczają maksymalne wartości obwiedni? Jeśli jednak są to wartości chwilowe, to we wzorze prawdopodobnie brakuje znaku sumy lub całki.
 - b. W Tabeli 5.3 brakuje wiersza odpowiadającego częstotliwości 150 kHz. Dobrze by było to wyjaśnić w tekście – w tym miejscu rozprawy nie jest to jasne dla czytelnika.
 - c. Testy zbieżności przestrzennej przeprowadzono z wykorzystaniem przebiegów czasowych w zakresie do 250 us (Rysunek 5.6a). Jednak w dalszej części rozprawy symulacje są przeprowadzane dla znacznie dłuższych odcinków czasowych (do 1600 us). Czy krzywe otrzymane dla $p=7,9,11$ pokrywałyby się również dla dłuższych odcinków czasowych?
 - d. Rozdział 5.6.2: Jaki krok czasowy został ostatecznie wykorzystany podczas obliczeń? Czytelnikowi nieco też brakuje porównania (na dłuższych odcinkach czasowych) przebiegów obliczonych dla paru długości kroku czasowego (poniżej wartości krytycznej), podobnie jak to miało miejsce na Rys. 5.6a dla różnych wartości p .
- 5) Rozdział 6.3: walidacja eksperymentalna przeprowadzona z wykorzystaniem lasera skanującego i pełnego pola prędkości (Rys. 6.7-12) jest interesująca i przekonująca, lecz ma charakter głównie wizualny i jakościowy. Czy możliwe byłoby wprowadzenie pewnych miar ilościowych? Jakie mogłyby to być miary?
- 6) Rozdział 6.4: walidacja z wykorzystaniem czasowych przebiegów odpowiedzi czujników opiera się głównie na maksymalnej amplitudzie i czasie jej przybycia (ToF). Wydaje się jednak, że te dwa wskaźniki relatywnie łatwo jest dostroić numerycznie (przynajmniej w pewnym zakresie) poprzez zmiany współczynnika tłumienia oraz procentowej zawartości włókien w modelowanym materiale warstwy zewnętrznej. Czy nie byłoby wskazane wprowadzenie dodatkowych wskaźników jakości obejmujących dłuższe odcinki czasowe symulowanej i zmierzonej odpowiedzi, a nie wyłącznie piki obwiedni? Byłoby to zgodne z dwoma ostatecznie wybranymi wskaźnikami uszkodzenia, które są wyliczane na podstawie całego okna czasowego, a nie jedynie głównego piketu.

- 7) Rozdział 7.1: ostatecznie wyznaczone wskaźniki są obliczane na podstawie sygnału o pełnej długości. Jaka to jest długość i jak została ona wyznaczona? Wydaje się, że tej informacji nie ma w tekście podanej wprost.
- 8) Rozdział 7.1, proponowane wskaźniki uszkodzenia (zależności 7.2 – 7.7):
 - a. Proponowane wskaźniki mają nieco zróżnicowany charakter. Na przykład w wypadku $e_H = e_D$ (brak uszkodzenia) P2P jest równe zero, lecz pozostałe wskaźniki są równe 1. W miarę różnicowania się e_D od e_H , wartości niektórych wskaźników mogą rosnąć, innych maleć, a jeszcze innych rosnąć lub maleć. Być może dobrze by było zwrócić na to uwagę w tekście.
 - b. Wartości pierwszych trzech wskaźników (P2P, SAPS i SAPR) są ze sobą związane w sposób deterministyczny.
 - c. W kontekście dwóch powyższych uwag wydaje się, że zdanie porównujące wielkości wskaźników otrzymanych dla S0 i A0 (str.74, 4–5 linia tekstu od góry) nie jest do końca uzasadnione.
- 9) Str. 81 i Rys. 7.12: podane rozbieżności rozmiarów uszkodzenia są bardzo niewielkie, lecz dotyczą odległości pomiędzy aproksymowanymi krzywymi. Odległości rzeczywistych punktów pomiarowych są znacznie większe. Błąd wyznaczenia rozmiaru uszkodzenia w praktyce zależy nie tylko od błędu systematycznego krzywej, lecz również od rozrzutu pomiarów wokół krzywej. Czy nie należałoby zwrócić na to uwagę w tekście?
- 10) Rys. 8.3b: wydaje się, że przypadek (5) różni się od przypadku (6) jedynie symetrią (odbicie względem poziomej osi symetrii). Otrzymane z symulacji obwiednie jednak istotnie się różnią. Dlaczego?
- 11) Wydaje się, że wiele wykresów w rozprawie powinno przedstawiać ten sam bazowy przebieg obwiedni. Dotyczy to na przykład Rys. 6.16b, Rys. 8.3(0) i Rys. 8.4(100%). Jednak przebiegi się różnią. Dlaczego? To samo pytanie dotyczy też przebiegów samych pików przedstawionych np. na Rys. 8.4(100%) i Rys. 8.5(100%).
- 12) Analiza wrażliwości przedstawiona w Rozdziałach 8.2.1–8.2.3 dotyczy przebiegów obwiedni. Czy można na podstawie wyników tej analizy wyciągnąć jakieś wnioski dotyczące wrażliwości MADIF?

6. Uwagi techniczne i redakcyjne

Rozprawa sformułowana jest w języku angielskim, a jej angielszczyzna jest zasadniczo poprawna, zrozumiała i przejrzysta. Skład rozprawy jest estetyczny i bardzo staranny. Poniższe uwagi nie mają charakteru merytorycznego, a jedynie techniczno-redakcyjny.

- Str. 22: we wzorze 4.5 siła jest oznaczona symbolem f_{ext} (mała litera), a w akapicie poniżej wzoru symbolem F_{ext} (wielka litera). Ta rozbieżność to prawdopodobnie literówka.
- Str. 32: czy „transferred matrix” nie powinno być zastąpione „transformed matrix”?
- W Rozdziale 4.8: stabilność algorytmu całkowania numerycznego to nie jest niezależność od kroku czasowego (w tekście: „stable, i.e., independent of the time step”). To określenie należałoby zmodyfikować.
- Na str. 45 wysokość uszkodzenia podana jest jako 170 mm, natomiast na str. 57 jako 175 mm. Któraś z tych wartości powinna być skorygowana.
- Na str.45 pojawia się etykieta systemu LaTeX: „(fig:disbond)”.

7. Podsumowanie

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Piotra Fiborka dotyczy aktualnego i oryginalnego tematu z obszaru nieniszczących metod identyfikacji uszkodzeń elementów konstrukcyjnych oraz obliczeniowych aspektów propagacji fal prowadzonych w elementach o złożonej geometrii. Rozwiązując postawiony problem badawczy Doktorant posłużył się klasyczną metodyką prowadzenia badań naukowych i wykazał się umiejętnością samodzielnego i bardzo systematycznego ich prowadzenia. Osiągnięte wyniki są oryginalne i interesujące dla szerszego środowiska naukowego. Rozprawa zaowocowała szeregiem publikacji w uznanych czasopismach naukowych i generuje dalsze problemy badawcze, co potwierdza jej istotność. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter techniczny i w żaden sposób nie umniejszają wartości pracy.

Recenzowana praca spełnia warunki stawiane formalnie i zwyczajowo rozprawom doktorskim, w szczególności stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy Pana mgr. inż. Piotra Fiborka do publicznej obrony.

Wnioskuje również o wyróżnienie pracy. Wniosek ten uzasadniam:

- 1) ponadprzeciętnie szerokim zakresem oryginalnych badań Doktoranta,
- 2) imponującą systematycznością, starannością i dbałością o szczegóły z jaką zostały one przeprowadzone oraz
- 3) istotnością oraz potencjałem badawczym i aplikacyjnym otrzymanych wyników.

Wyróżniającą ocenę pracy potwierdza również znaczna liczba zgromadzonych w krótkim czasie obcych cytowań publikacji Pana Piotra Fiborka prezentujących częściowe wyniki rozprawy (według bazy Scopus: 4.8 cytowań obcych rocznie na każdy opublikowany artykuł).