

Prof. dr hab. inż. Marcin Kamiński
 Katedra Mechaniki Konstrukcji
 Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
 Politechnika Łódzka
 Al. Politechniki 6, 93-590 Łódź

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jafara Amraei
„Thermo-mechanical fatigue life assessment of polymer-matrix composites under
temperature control and different loading regimes”

1. Podstawa opracowania recenzji i sylwetka kandydata

Przedmiotem niniejszej opinii jest recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jafara Amraei, doktoranta na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Śląskiej zatytułowana „Thermo-mechanical fatigue life assessment of polymer-matrix composites under temperature control and different loading regimes”. Rozprawa ta została napisana pod kierunkiem Pana dr hab. inż. Andrzeja Katunina, prof. Politechniki Śląskiej, a promotorem pomocniczym był Pan dr inż. Dominik Wachla. Recenzja niniejsza została wykonana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, Pani dr hab. inż. Alicji Piaseckiej-Belkhat, prof. Politechniki Śląskiej na podstawie Uchwały właściwej Rady Dyscypliny podjętej w dniu 26go marca 2025 r. Podstawę prawną wykonania recenzji stanowi ustawa *Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce* z dnia 20.07.2018 r., art. 187 (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571).

Pan mgr inż. Jafar Amraei ukończył w roku 2016 trzyletnie studia magisterskie w zakresie inżynierii materiałów kompozytowych na Malek-Ashtar University of Technology w Teheranie w specjalizacji Composite Structures Design. Przedstawił w związku z tym pracę magisterską na temat „Micromechanics-Based Multiscale Modeling of Polymer Nano-composites Reinforced with Carbon Nanotubes”. W latach 2017-2021 pracował jako badacz w dziedzinie materiałów kompozytowych na Sharif University of Technology w Teheranie. Kolejno w latach 2021-2024 był słuchaczem Wspólnej Szkoły Doktorskiej Politechniki Śląskiej w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna i jednocześnie był zatrudniony w charakterze asystenta w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn na tej samej uczelni. W materiałach z przewodu doktorskiego możemy znaleźć informację, iż baza Scopus wyświetla 14 jego publikacji ze 151 cytowaniami, co daje Mu łącznie indeks Hirscha równy 5 oraz skumulowany IF wynoszący 60.58. Dla porównania indeks Hirscha Promotora wynosi aktualnie 26 według tej samej bazy danych.

Biurowisko Dziekana

wpłynęło dnia 15.05.2025
 RDJMe/156154/2025
 zat.

2. Przedmiot i zakres rozprawy

Rozprawa została przedstawiona w języku angielskim, w postaci tematycznego cyklu publikacji współautorskich z odpowiednim wstępem, opisem i podsumowaniem najważniejszych wyników. Na jej treść składają się kolejno podziękowania, wstęp, wykaz publikacji wraz z deklaracją udziałów Doktoranta w ich napisaniu, spis treści, wykaz rysunków, tabel, a także oznaczeń, jak również opis przyjętych oznaczeń. Dalsza, merytoryczna część rozprawy zawarta na 86 stronach składa się z siedmiu rozdziałów, bibliografii oraz streszczeń w języku polskim i angielskim, tak więc przedstawiona rozprawa spełnia ustawowy wymóg formalny stawiany pracom doktorskim. Do skróconego opisu cyklu publikacji przywołano 126 pozycji literaturowych. W następnej kolejności przedstawiono załączniki, w których Doktorant zestawił publikacje składające się na cykl stanowiący Jego rozprawę, po których następują deklaracje współautorów. Załączniki stanowią objętościowo największą część pracy – 250 stron.

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień zmęczenia kompozytów o matrycach polimerowych często stosowanych w różnych rozwiązaniach inżynierskich w skali przemysłowej i indywidualnej. Kompozyty te były analizowane pod zróżnicowanymi cyklami obciążeń, więc wyniki analizy mają dość duży charakter ogólności. W kompozytach tych uwzględniono również zjawisko nagrzewania się, co znacząco utrudnia modelowanie matematyczno-numeryczne; badania eksperymentalne są również znacznie bardziej złożone. Ten aspekt świadczy o oryginalności przeprowadzonych badań, gdyż termo-mechaniczne badania i symulacji zmęczeniowe materiałów kompozytowych na bazie polimerów same w sobie nie są już nowością. Tematyka materiałów kompozytowych, ich projektowania i zjawisk z nich zachodzących nadal cieszy się dużą popularnością pomimo wielu publikacji i modeli matematyczno-numerycznych, a jej znaczenie techniczne nie słabnie. Z pewnością analiza takiej problematyki wymagała dobrego przygotowania Doktoranta i głębokiej wiedzy przede wszystkim z zakresu mechaniki materiałów kompozytowych.

Na cykl publikacji stanowiących rozprawę składają się tutaj następujące artykuły, z których siedem zostało opublikowanych, a jeden znajduje się na etapie recenzji:

- [1] J. Amraei, A. Katunin, Recent advances in limiting fatigue damage accumulation induced by self-heating in polymer matrix composites opublikowany w czasopiśmie Polymers w roku 2022 (wkład 70 %, 100 pkt., Scimago H-index=167);
- [2] P.N.B. Reis , A. Katunin, J. Amraei, Critical analysis of the systems used to reduce self-heating in polymer composites subjected to very high cycle fatigue regimes, zamieszczony w roku 2025 w periodyku Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures (wkład 15%, 100 pkt., Scimago H-index=104);

- [3] J. Amraei, A. Katunin, M. Lipińska, Numerical simulation and experimental validation of self-heating of polymer-matrix composites during low-cycle fatigue loading opublikowany w International Journal of Fatigue (wkład 65%, 140 pkt., Scimago H-index=163);
- [4] J. Amraei, T. Rogala, A. Katunin i inni, Thermomechanical fatigue behavior of CF/PEKK composite under low and ultrasonic frequencies opublikowane w periodyku Composites Part B, zeszyt z roku 2024 (wkład 25%, 200 pkt., Scimago H-index=227);
- [5] A. Premanand, T. Rogala, D. Wachla, J. Amraei i inni, Fatigue strength estimation of a CF/PEKK composite through self-heating temperature analysis using cyclic bending tests at 20 kHz zamieszczone w Composites Science & Technology, nr 243 z roku 2023 (wkład 10%, 200 pkt., Scimago H-index=259);
- [6] J. Amraei, A. Katunin, Thermomechanical fatigue life assessment of polymer-matrix composites via entropy-based damage evolution and stiffness degradation under different frequencies, Composites Part B: Engineering, numer 298 z roku 2025 (wkład 80%, 200 pkt., Scimago H-index=227);
- [7] J. Amraei, T. Rogala, A. Katunin i inni, Synergistic effects of graphene nanoplatelets and carbon nanofibers on thermomechanical fatigue response of modified glass/epoxy composites, przesłane do International Journal of Fatigue (wkład 35%, 140 pkt., Scimago H-index=163);
- [8] J. Amraei, A. Katunin, D. Wachla, K. Lis, Damage assessment in composite plates using extended non-destructive self-heating based vibrothermography technique, który został opublikowany w czasopiśmie Measurement w zeszycie 241 z bieżącego roku (wkład 50%, 200 pkt., Scimago H-index=146).

Pozycja [1] jest artykułem Doktoranta napisanym wspólnie z Promotorem definiuje i charakteryzuje zjawisko nagrzewania się materiałów kompozytowych z polimerowymi matrycami. Praca omawia ostatnie badania eksperymentalne i modele teoretyczne z tego zakresu z uwzględnieniem krzywych i histerez S-N otrzymanych przy różnych temperaturach otoczenia, przykładów zniszczenia kompozytowych elementów maszyn wywołanych tym zjawiskiem, analizy fenomenologicznej zjawiska nagrzewania się z uwzględnieniem zmian dyssypacji energii w trakcie cyklu zmęczeniowego, jak również sposobom zabezpieczania kompozytów polimerowych. Z praktycznego punktu widzenia ważne są przedstawione w pracy schematy zniszczenia polimerowych kompozytów włóknistych z uwzględnieniem łańcuchów polimerowych i ciekawa dokumentacja fotograficzna pęknięć zmęczeniowych w tych kompozytach. Bardzo istotna z aplikacyjnego punktu widzenia jest zamieszczona tam dyskusja aspektów środowiskowych w praktycznych warunkach pracy kompozytów z uwzględnieniem wilgotności oraz temperatury otoczenia. Autorzy przedstawiają w kolejności różne stanowiska i eksperymentalne metody badawcze do analizy zmęczenia kompozytów polimerowych dyskutując przy okazji wpływ różnych

materiałowych i geometrycznych parametrów projektowych na ich trwałość zmęczeniową. Publikacja ta jest niezwykle obszerna (88 stron oraz 285 źródeł literatury) i stanowi bardzo dobry punkt wyjściowy do dalszych badań eksperymentalnych. Świadczy ona o dogłębnym rozeznaniu literatury przedmiotu, które Doktorant zrobił przed przystąpieniem do swoich analiz.

Drugie w kolejności trójautorskie opracowanie zawiera krytyczne studium systemów wykorzystywanych w praktyce inżynierskiej do redukcji nagrzewania się kompozytów polimerowych poddanych wysoko-cyklowym obciążeniom zmęczeniowym. Tematem wiodącym w tej pracy jest sygnalizowany wcześniej wybór składnika stanowiącego wypełnienie takiego kompozytu polimerowego i jego wpływ na zjawisko nagrzewania się. Tabelaryczne zestawienie różnych rozwiązań w tym zakresie ciągnie się przez prawie 5 stron tekstu, a uwzględniono w nim włókna szklane, węglowe, ale także i współcześnie rozwijane nanorurki węglowe. Publikacja ta raportuje również zależności pomiędzy liczbą cykli zmęczeniowych a zmianami temperatury maksymalnej, jak również zależność generowanego ciepła od obserwowanej amplitudy obciążeń maksymalnych. Praca ta jakkolwiek obszerna i wnikliwa, nie przedstawia również żadnych oryginalnych badań Doktoranta w przedmiotowym zakresie, a jedynie – dyskusję dostępnych modeli i rozwiązań kompozytowych.

Natomiast w publikacji [3], stworzonej wspólnie z Promotorem i Panią Magdaleną Lipińską z Politechniki Łódzkiej, Doktorant przedstawia badania eksperymentalne, a także model numeryczny zjawiska zniszczenia zmęczeniowego kompozytu polimerowego poddanego obciążeniu nisko-cyklowemu. Formułuje się i wykorzystuje w tym celu termo-lepko-sprężysty związek konstytutywny takiego materiału z wykorzystaniem szeregów Prony sparametryzowanych częstością i temperaturą. Z zastosowaniem takiego aparatu matematycznego wyznaczona zostaje wielkość ciepła generowanego przez obciążenie cykliczne tego kompozytu. Kolejno zaproponowany zostaje trójwymiarowy model numeryczny zgodny ze sformułowaniem Metody Różnic Skończonych, w którym najważniejszym problemem było odpowiednie zdefiniowanie realistycznych termicznych warunków brzegowych. Kolejno przedstawiono stanowisko eksperymentalne do badania modułu sprężystości poprzecznej kompozytu oraz procedurę opracowania wyników stworzoną w systemie algebry komputerowej MATLAB, który wykorzystano do wizualizacji wyników oraz do regresji wyników eksperymentów. Praca jest bogato ilustrowana m.in. zależnościami temperatury od cykli zmęczeniowych, które wyraźnie pokazują dobrą zgodność stworzonego modelu numerycznego z przeprowadzonym eksperymentem.

Pozycja [4] została napisana przez dziesięciu współautorów i jest owocem międzynarodowej współpracy polsko-niemieckiej. Traktuje ona o termomechanicznym zmęczeniu polimerowych kompozytów zbrojonych włóknami węglowymi, w którym Autorzy analizują wpływ niskich oraz ultradźwiękowych częstości; analizowany polimer ma budowę pół-

krystaliczną. Celem analizy było stworzenie modelu numerycznego i przeprowadzenie odpowiednich badań eksperymentalnych. Symulacja komputerowa została wykonana z wykorzystaniem programu ANSYS realizującego Metodę Elementów Skończonych, w którym przeprowadzono analizę modalną i harmoniczną. Przeprowadzone w tym przypadku badania eksperymentalne miały na celu ustalenie emisyjności badanego kompozytu i wykonano je dla około miliona cykli. Na załączonych zdjęciach przedstawiono stanowisko do zginania trzypunktowego z wykorzystaniem kamery termowizyjnej próbki kompozytu. Wśród wielu cennych wyników uzyskano zależności temperatury od liczby cykli zmęczeniowych, a także różne metody i rezultaty regresji – od liniowej po podwójną wykładniczą. Aproksymacje te miały na celu wyznaczenie krytycznej temperatury nagrzewania się kompozytu w funkcji cykli zmęczeniowych. Do analiz tych załączono zdjęcia mikrostruktury kompozytu ilustrujące delaminację międzywarstwową w badanych próbkach. We wnioskach można doczytać się, iż schemat zniszczenia różnych próbek wykazywał znaczące podobieństwa w przypadku niskich oraz ultradźwiękowych częstotliwości.

Kolejny artykuł [5] zaliczony do cyklu publikacji został poświęcony zagadnieniu wyznaczania nośności zmęczeniowej poprzednio analizowanego kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi. Praca powstała przy udziale ośmiu współautorów, a badania były sponsorowane w ramach projektu badawczego z DFG. W modelu tym uwzględnia się nagrzewanie się materiału w trakcie obciążenia cyklicznego, a analiza została przeprowadzona z wykorzystaniem testu zginania o częstotliwości 20 kHz. Tym razem analizy miały charakter czysto eksperymentalny i zostały przeprowadzone metodami ultradźwiękowymi. Badaniom, jak w przypadku poprzedniej pracy, poddana została prostokątna próbka kompozytu, w której inicjacja zniszczenia nastąpiła w środku dolnej części materiału. Wykonano testy ze stałą amplitudą obciążeń, a także z amplitudą narastającą. Odnotowano wyraźny wzrost intensywności nagrzewania się kompozytu wraz ze wzrostem liczby cykli zmęczeniowych. Zasadniczo nowym elementem tej pracy była analiza statystyczna przeprowadzona w oparciu o posiadane serie danych eksperymentalnych, ale jej znaczenie dla wnioskowania o charakterze statystycznym jest ograniczone ze względu na małą ilość próbek. W opisie badań można znaleźć ciekawą informację, iż temperatura, do jakiej nagrzała się próbka w trakcie badań wynosiła około 80°C, co jest wartością znaczącą. Pozostałą część pracy poświęcono na analizę wpływu czasu przerwania obciążeń cyklicznych na wytrzymałość zmęczeniową kompozytu, a także na teoretyczną analizę dyssypacji energii i jej zmian w celu ustalenia krytycznej temperatury nagrzewania się kompozytu.

Praca [6] napisana przez Doktoranta wspólnie z Promotorem została poświęcona zagadnieniu termomechanicznej trwałości zmęczeniowej kompozytów polimerowych z wykorzystaniem ewolucji zniszczenia i redukcji sztywności wywołanych zróżnicowanymi

częstotliwościami drgań. Wykorzystano podejście oparte na entropii termodynamicznej i analizowano w niej kompozyt szklano-epoksydowy produkcji polskiej. Jak w wielu innych pracach do wyznaczenia krzywych S-N wykorzystano analityczny wzór opisujący naprężenia zginające w próbce kompozytu. W celu określenia wytrzymałości zmęczeniowej wykorzystano znaną już z poprzednich prac metodę termograficzną. Uzyskane wyniki łączące wzrost temperatury oraz przyrost dyssypacji ciepła z naprężeniami maksymalnymi w próbce poddano analizie regresji biliniowej; w dalszej części pracy przeprowadzono nawet regresję z wykorzystaniem trzech prostych o zróżnicowanym kącie nachylenia. Docelowo opracowano standardowy wykres S-N w formie statystycznej pokazując dopuszczalne przedziały zmienności odpowiednich funkcji logarytmicznych dla dwóch wybranych częstotliwości 40 oraz 50 Hz. Uzyskane wyniki wyraźnie pokazują wyraźny wzrost temperatury i dyssypacji ciepła przy narastających naprężeniach maksymalnych. Obok różnego rodzaju aproksymacji można znaleźć w tej pracy także analizy termograficzne wykonane dla różnej ilości cykli zmęczeniowych. Za unikalne wyniki w skali całego cyklu publikacji należy uznać zależności entropii termodynamicznej pokazane dla różnych poziomów naprężeń maksymalnych w funkcji cykli zmęczeniowych. Przedstawiony jest wyraźny monotoniczny wzrost tej entropii, która pod koniec procesu obciążania zmęczeniowego wykładniczo się zwiększa. Ostatnia grupa wyników pokazuje redukcję sztywności otrzymaną w również w funkcji cykli zmęczeniowych, a zależności opisujące dynamiczny moduł Younga badanego kompozytu w funkcji naprężeń maksymalnych pokazują szybki spadek tego modułu pod koniec procesu zmęczeniowego. Wyniki dotyczące wzrostu entropii i spadku modułu sprężystości są zgodne z intuicją inżynierską w tym zakresie. Publikacja ta pokazuje istotny wkład Doktoranta w badania zmęczeniowe, a także dobrze ilustruje Jego zrozumienie wykorzystywanej metodologii eksperymentalnej i mechanizmu zniszczenia.

Publikacja [7] została złożona dopiero do druku, a jej tematyka jest związana z zastosowaniem płytek grafenu oraz nano-włóknami i ich wpływem na termomechaniczną trwałość zmęczeniową zmodyfikowanych kompozytów szklano-polimerowych. Ponieważ praca nie została ani opublikowana, ani też nie załączono żadnej recenzji, więc jako jej treść merytoryczna nie będzie oceniana przez Recenzenta. Niemniej jednak tematyka wydaje się niezwykle aktualna i interesująca, natomiast zastosowane narzędzia i metody są znane z poprzednich badań zespołu, do którego należy Doktorant.

W ostatniej z tego cyklu pracy [8] Doktorant wraz z trzema innymi współautorami analizowali proces zniszczenia płyt kompozytowych z wykorzystaniem techniki nieniszczącej opartej na badaniu wibro-termograficznym. Praca ta zawiera zarówno aspekty numeryczne, jak i przede wszystkim – eksperymentalne. W zakresie symulacji komputerowej wykonano analizę modalną z wykorzystaniem programu Metody Elementów Skończonych ANSYS, w której

modelowano płytę prostokątną z otworami przy kilku różnych grubościach i różnych gęstościach siatek przygotowanych z wykorzystaniem trójkątnych elementów skończonych. Dalsza analiza doświadczalna składała się z dwóch etapów, do których można zaliczyć: (1) wyznaczenie częstości własnej drgań płyty i kolejno (2) analizę drgań elementu kompozytowego poddanego wzbudzeniu bliskiemu drganiom własnym. Drugi etap miał na celu wywołanie zjawiska nagrzewania się kompozytu i dalszą analizę uszkodzeń - w tym celu wykonywano m.in. termogramy w różnych chwilach badanego procesu; jak należało oczekiwać lokalizacja uszkodzeń następowała w środku badanej płytki. W formie wykresów przedstawiono również przyrosty temperatury, do jakiej nagrzał się element kompozytowy w danym momencie. W przeciwieństwie do poprzednich prac nie zaproponowano żadnej analitycznej aproksymacji uzyskanych danych eksperymentalnych.

W podsumowaniu, za najważniejszą pozycję należy uznać zdaniem Recenzenta artykuł [3] z tej listy opublikowany w znanym czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym, które prezentuje wyłącznie artykuły związane z zagadnieniami zmęczenia materiałów inżynierskich, którego kolegium redakcyjne gromadzi wybitnych ekspertów z tej właśnie dziedziny mechaniki materiałów.

3. Ocena przedstawionej rozprawy

Przedstawiona rozprawa jest niewątpliwie niezwykle obszerna i bogato ilustrowana zarówno wynikami własnymi, jak i wieloma dostępnymi w literaturze przedmiotu, a także dobrze osadzona w literaturze poświęconej tematyce zmęczenia materiałów kompozytowych. Recenzentowi zabrakło natomiast odwołania się do wyników diskutowanych w pracach K. Reifsnidera (np.: W.W. Stinchcomb, K.L. Reifsnider, *Fatigue damage mechanisms in composite materials: a review*) oraz T. Yokobori, których prace są uznawane za klasyczne. W artykule [5] nie przeprowadzono natomiast przeglądu metod probabilistycznych i stochastycznych w analizie zmęczeniowej, chociaż temat ten jest dobrze udokumentowany w literaturze, nawet polskojęzycznej (por. K. Sobczyk, B. Spencer, *Stochastyczne modele zmęczenia materiałów*).

Wszystkie przedstawione publikacje, ale także i ich opis wykonany samodzielnie przez Doktoranta zostały napisane prawidłowo od strony językowej i edycyjnej, w sposób komunikatywny i przejrzysty. Co prawda pewna część publikacji ma bardzo wielu autorów, ale wkład Doktoranta do każdej z nich okazał się znaczący. Do błędów edycyjnych rozprawy należy bez wątpienia zaliczyć umieszczenie spisu treści w środku początkowej części całości, co w pewien sposób utrudnia przeszukiwanie tekstu. Ponadto deklaracje dotyczące ilościowego

wkładu Doktoranta do poszczególnych artykułów składających się na przedstawiony cykl publikacyjny zostały zamieszczone zarówno na początku, jak i na końcu rozprawy. We wstępie brakuje gdzieś postawienia tezy badawczej, iż zjawisko nagrzewania się kompozytów polimerowych poddanych cyklicznym obciążeniom zmęczeniowym może prowadzić do znaczącej redukcji ich sztywności i wytrzymałości zmęczeniowej. Pewne usterki redakcyjne wynikające najprawdopodobniej z ograniczonego czasu na przygotowanie rozprawy nie mają istotniejszego wpływu na jej ocenę ogólną.

Przedstawiony cykl publikacji opatrzony wstępem bardzo dobrze odzwierciedla temat rozprawy i jest całkowicie monotematyczny. Wybór publikacji składających się na rozprawę został dokonany w sposób wyróżniający, gdyż według bazy Google Scholar Doktorant był już współautorem siedemnastu artykułów (indeks $H=6$), z czego wybrano mniej niż połowę najlepszych prac dobrze pasujących do tematyki. Patrząc na cały dorobek Kandydata trudno oprzeć się wrażeniu, że z pozostałych prac można byłoby wybrać osobną tematykę, więc mógłby on nadawać się na rozprawę habilitacyjną. Niewątpliwie wkład merytoryczny do każdej z przedstawionych w cyklu publikacji był relatywnie duży poza pozycją nr 5, nie ma to jednak znaczącego wpływu na ogólny obraz dorobku doktorskiego i wysiłku naukowego Kandydata.

Należy stwierdzić, iż przedstawiona rozprawa prezentuje solidną wiedzę teoretyczną i eksperymentalną Doktoranta w zakresie analizy zjawisk zmęczenia kompozytów polimerowych z uwzględnieniem zjawiska nagrzewania się. Do dyskusji w trakcie publicznej obrony pozostaje sposób wyznaczania naprężeń w badanych próbkach – wykorzystane proste oszacowanie analityczne ma swoje ograniczenia, które mogą częściowo wpływać na przeprowadzane tu analizy. Rozważany problem naukowy został rozwiązany w oryginalny sposób, a wyniki rozprawy mogą znaleźć zastosowanie w sferze gospodarczej, również w skali międzynarodowej. Świadczy o tym wysoka ranga każdego z czasopism, w których opublikowano kolejne wyniki składające się na rozprawę – połowa cyklu została zamieszczona w najwyżej punktowanych czasopismach z wybranej dyscypliny, co należy do rzadkości. Załączone publikacje i podany wkład Doktoranta do każdej z nich wskazują jednoznacznie na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Istotnym aspektem tej rozprawy jest znacząca współpraca międzynarodowa m.in. z niemieckim ośrodkiem badawczym we Freiburgu, Politechniką w Mediolanie oraz z Uniwersytetem w Coimbrze, w wyniku której uzyskano szereg ciekawych i ważnych wyników. Świadczy ona jednoznacznie o nowatorstwie i oryginalności przeprowadzonych i udokumentowanych badań.

W trakcie kompletowania rozprawy Kandydat wykazał się znaczącą wiedzą z zakresu badań eksperymentalnych i technik ich opracowywania, ale także pewnym przygotowaniem do modelowania numerycznego. W opisie analiz numerycznych odczuwa się jednak pewien

niedostatek z powodu braku szczegółów obliczeniowych – trudno doszukać się konkretnych informacji dotyczących sposobu dyskretyzacji, szczegółowych parametrów procesów obliczeniowych itd., ale duża zgodność z modelami eksperymentalnymi wyklucza wątpliwości natury merytorycznej. Doktorant stosuje zamiennie Metodę Elementów Skończonych oraz Metodę Różnic Skończonych, ale główny nacisk przypada raczej na eksperyment, niż na kalibrację modelu komputerowego. Uzyskana zgodność jakościowa pomiędzy modelowaniem numerycznym i analizą eksperymentalną bez podania szczegółowego opisu tego modelowania może mieć niestety charakter przypadkowy i wymaga uszczegółowienia. Modele numeryczne wykazują pewną wrażliwość na parametry obliczeniowe, których Doktorant nie przytoczył. Nie zmienia to jednak ogólnej oceny przedstawionej rozprawy doktorskiej, która jest bardzo dobra.

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa mgr inż. J. Amraei w postaci cyklu publikacji wraz z odpowiednio rozbudowanym opisem i streszczeniem spełnia kryteria ustawowe stawiane rozprawom doktorskim wymienione w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. W opinii Recenzenta powinna zostać ona dopuszczona do publicznej obrony. Dodatkowo, ze względu na charakter i ilość publikacji, a także duży wkład Doktoranta w ich powstanie, jak również prestiżowy charakter czasopism, w których się one ukazały, Recenzent wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Marcin Kamiński, Łódź, 15.05.2025 r.

