

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. Damiana Mrówczyńskiego
„Modelowanie konstytutywne i homogenizacja papieru i tektury falistej”**

1. Podstawa opracowania recenzji i sylwetka kandydata

Przedmiotem niniejszej opinii jest recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Damiana Mrówczyńskiego, doktoranta na Wydziale Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu zatytułowana „*Modelowanie konstytutywne i homogenizacja papieru i tektury falistej*”. Rozprawa ta została napisana pod kierunkiem Pana prof. UPP dr hab. inż. Tomasza Garbowskiego z Katedry Biosystemów UPP, a promotorem pomocniczym była Pani dr hab. inż. Anna Knitter-Piątkowska z Instytutu Analizy Konstrukcji Politechniki Poznańskiej. Recenzja niniejsza została wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Pana dr hab. inż. Krzysztofa Koszeli, prof. UPP na podstawie Uchwały właściwej Rady Dyscypliny podjętej w dniu 5go czerwca 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. Damian Mrówczyński ukończył w roku urodzony 28.07.1997 r. w Koninie ukończył studia inżynierskie i magisterskie na Politechnice Poznańskiej na kierunku Budownictwo. Dyplom magisterski uzyskał 21 czerwca 2021 r. za pracę pt. „Nieliniowa analiza zespolonych przestrzennych konstrukcji ramowych”. Po ukończeniu studiów był zatrudniony w firmie FEMat sp. z o.o. od listopada 2019 r., a potem na stanowisku młodszego specjalisty od maja 2020 r. do dnia dzisiejszego. Od października 2021 r. był słuchaczem w Szkole Doktorskiej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Według bazy *Google Scholar* Doktorant opublikował 23 prace, które były cytowane 274 razy, co daje sumaryczny indeks Hirscha równy 10, natomiast baza danych *Scopus* wyświetla 9 Jego publikacji ze 180 cytowaniami, co daje Mu łącznie indeks Hirscha równy 9. Dla porównania indeks Hirscha Promotora wynosi aktualnie 26 według *Google Scholar* (2033 cytowania), a *Scopus* podaje ten sam indeks jako równy 22 (z 1233 cytowaniami).

2. *Przedmiot i zakres rozprawy*

Rozprawa została przedstawiona w języku polskim pod tytułem „*Modelowanie konstytutywne i homogenizacja papieru i tektury falistej*”, w postaci tematycznego cyklu sześciu publikacji współautorskich z odpowiednim wstępem, opisem i podsumowaniem najważniejszych wyników. Na jej treść składają się kolejno wykaz artykułów stanowiących podstawę do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych, tzw. wykaz skrótów, streszczenie w języku polskim i angielskim zgodnie z wymaganiami ustawy. W dalszej części znajduje się wstęp, cele rozprawy i hipoteza badawcza, opis materiałów i metod badawczych, wyniki badań, ich dyskusja, a także wyciągnięte na jej podstawie wnioski. Główną część opisu badań zamyka wykaz literatury z 70 pozycjami, po którym można znaleźć kopie wybranych do cyklu publikacji artykułów, a także oświadczenia współautorów dotyczącego jakościowego wkładu każdego z nich w konkretny artykuł. We wstępie do rozprawy Doktorant stwierdza jednoznacznie, iż za główny nowatorski aspekt swojej rozprawy uważa zastosowanie metod numerycznych ze szczególnym uwzględnieniem metody homogenizacji do analizy zmian sztywności tektury falistej wskutek jej uszkodzeń. W tym celu w pracy badano wpływ wilgotności, temperatury, nacięć i perforacji, ale również jej przegniecień powstających na etapie produkcji, transportu, a nade wszystko jej eksploatacji. W swojej rozprawie Doktorant wykorzystuje ogólnie znany i sprawdzony model oparty o porównanie energii odkształcenia ośrodka niejednorodnego i zastępczej struktury jednorodnej.

Do przedstawionego cyklu publikacji składających się na rozprawę doktorską włączono następujące artykuły:

- [1] Garbowski, T., Gajewski, T., Mrówczyński, D., Jędrzejczak, R. (2021). Crushing of Single-Walled Corrugated Board during Converting: Experimental and Numerical Study. *Energies*, 14(11), 3203. <https://doi.org/10.3390/en14113203>; MNiSW = 140 pkt, IF = 3.252.
- [2] Garbowski, T., Knitter-Piątkowska, A., Mrówczyński, D. (2021). Numerical Homogenization of Multi-Layered Corrugated Cardboard with Creasing or Perforation. *Materials*, 14(14), 3786. <https://doi.org/10.3390/ma14143786>; MNiSW = 140 pkt, IF = 3.748.
- [3] Mrówczyński, D., Knitter-Piątkowska, A., Garbowski, T. (2022). Numerical Homogenization of Single-Walled Corrugated Board with Imperfections. *Applied Sciences*, 12(19), 9632. <https://doi.org/10.3390/app12199632>; MNiSW = 100 pkt, IF = 2.700.
- [4] Mrówczyński, D., Garbowski, T. (2023). Influence of Imperfections on the Effective Stiffness of Multilayer Corrugated Board. *Materials*, 16(3), 1295. <https://doi.org/10.3390/ma16031295>; MNiSW = 140 pkt, IF = 3.100.
- [5] Mrówczyński, D., Pozorska, J., Garbowski, T., Pozorski, Z. (2023). Bending stiffness of unsymmetrical multilayered corrugated board: Influence of boundary conditions. *BioResources*, 18(4), 7611-7628. <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.7611-7628>; MNiSW = 100 pkt, IF = 1.747.

[6] Mrówczyński, D., Gajewski, T., Cornaggia, A., Garbowski, T. (2024). Impact of Temperature and Humidity on Key Mechanical Properties of Corrugated Board. *Applied Sciences*, 14(24), 12012. <https://doi.org/10.3390/app142412012>; MNiSW = 100 pkt, IF = 2.500.

Pierwsza z przedstawionych publikacji zawiera badania eksperymentalne i symulacje numeryczne jednowarstwowej tektury falistej mające na celu weryfikację wpływu przygniecenia na jej sztywność. Przygotowane próbki tektury poddano eksperymentalnemu zgniataniu w zakresie od 10 do 70% grubości początkowej, a degradację sztywności materiału przeanalizowano z wykorzystaniem homogenizacji numerycznej zrealizowanej w systemie MES ABAQUS w zakresie sprężysto-plastycznym. Na podstawie serii eksperymentów dopasowano metodą regresji liniowej liniową łączącą zgniecenie struktury z redukcją sztywności struktury. Dodatkowo zaproponowano w tej publikacji funkcję wykładniczą opisującą zdeformowany kształt w trakcie zgniatania struktury. Praca została przygotowana przez czterech współautorów, a Doktorant uczestniczył częściowo w przeprowadzeniu badań i ich walidacji, przygotowaniu manuskryptu, modelu numerycznego i opracowaniu części graficznej.

Druga pozycja napisana przez Doktoranta, Promotora i Promotora Pomocniczego dotyczy numerycznej analizy wpływu perforacji i bigowania trójwarstwowej, a także pięciowarstwowej tektury falistej. Badano także wpływ przegniecenia oraz przesunięcia warstw pofalowanych na zmiany sztywności takiej struktury. W homogenizacji zrealizowanej z wykorzystaniem programu ABAQUS porównano energie odkształcenia modelu 3D tektury oraz uproszczonego modelu powłokowego; wykorzystano w tym celu anizotropowy model ciała liniowo-sprężystego. W pracy tej udało się wykazać, że zmiany sztywności struktury mają charakter nieliniowy. Wkład merytoryczny Doktoranta obejmował w tym przypadku przeprowadzenie badań i ich walidacji, przygotowanie manuskryptu oraz przygotowanie grafik.

Trzecia praca została poświęcona wpływowi imperfekcji geometrycznych na parametry mechaniczne tektury falistej o trzech warstwach. Zagadnienie rozwiązano w zakresie liniowo-sprężystym z uwzględnieniem oczywistej ortotropii struktury. W programie ABAQUS modelowano różne postaci niestateczności tektury wynikające z obciążeń ściskających, zginających, skręcających oraz ścinających z wykorzystaniem czterowzłowych elementów płytowych. Dodatkowo zastosowano metodę homogenizacji do wyznaczenia efektywnych sztywności struktury w różnych kierunkach.

Kolejny artykuł stanowi zastosowanie metodyki z poprzedniej pracy do analizy wpływu imperfekcji na sztywność tektury falistej pięciowarstwowej. Podobnie jak poprzednio, dane wejściowe przyjęto na podstawie odpowiedniej literatury, a symulacje komputerowe przeprowadzono dla próbek składających się z dużych i małych pofałdowań badanego materiału; dodatkowo przeanalizowano tutaj wpływ względnego przesunięcia pofałdowania górnego i dolnego, co stanowi znaczącą różnicę w stosunku do istniejących analiz. W pracy tej obliczono średnie procentowe zmiany sztywności w zależności od poziomu wprowadzonych imperfekcji, a także przedstawiono maksymalne rozbieżności poszczególnych sztywności tektury.

Publikacja zamieszczona w czasopiśmie *BioResources* opisuje eksperymenty numeryczne związane z czteropunktowym zginaniem asymetrycznej trój- i pięciowarstwowej tektury falistej. Dla obydwu typów tektury studiowano wpływ przesunięcia grzbietu fali względem podpory, a dla struktury pięciowarstwowej dodatkowo sprawdzono wpływ przesunięcia dwóch fal względem siebie. Zastosowano w tym przypadku uproszczony model numeryczny oparty o belkowe elementy skończone zgodne z teorią Timoshenki. Przeprowadzone w tej pracy eksperymenty umożliwiły wyznaczenie sztywności giętej badanych rodzajów tektury. Bardzo istotnym aspektem było zestawienie parametrów statystycznych badanych sztywności w postaci wartości oczekiwanych, odchyłeń standardowych, rozstępu, wartości maksymalnych i minimalnych, co może mieć duże znaczenie przy analizie niezawodności i trwałości różnego rodzaju tektur falistych.

Ostatnia publikacja tematycznie zasadniczo odbiega od poprzednich, gdyż jej Autorzy przedstawili i poddali analizie wyniki badań laboratoryjnych tektury falistej. Zostały one przeprowadzone w szerokim zakresie kombinacji temperatury otoczenia i wilgotności względnej, a ich celem było wyznaczenie wytrzymałości próbek pod przyłożonym obciążeniem, a także – ustalenie sztywności na zginanie, ścinanie oraz na skręcanie; wyznaczono również każdorazowo gramaturę, a także grubość tektury.

W podsumowaniu, za najważniejszą pozycję należy uznać zdaniem Recenzenta artykuł [4] z tej listy ze względu na fakt, iż został napisany jedynie z Promotorem, więc ocena rzeczywistego wkładu Doktoranta jest bezdyskusyjna. Ponadto porusza on ważne technicznie zagadnienie imperfekcji strukturalnych, które odgrywa istotną rolę we wszystkich dyscyplinach inżynierskich, a które wpływa zarówno na kontrolę jakości w fazie produkcji, a także – na prognozowanie trwałości analizowanych struktur i materiałów.

3. Ocena przedstawionej rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska jest ciekawa, obszerna i składa się z artykułów opublikowanych wyłącznie w prestiżowych międzynarodowych periodykach naukowych. Wymagało to dużego poświęcenia ze strony Doktoranta, ale także i głębokiej znajomości tematyki analizy i modelowania struktur falistych wykonanych z tektury, stosowanych metod numerycznych, oprogramowania ABAQUS oraz ambicji badawczej. Należy podkreślić, iż w trakcie zbierania materiału do rozprawy doktorskiej Doktorant opanował dobrze zaawansowane metody symulacji komputerowych z wykorzystaniem systemu Metody Elementów Skończonych ABAQUS, metody opracowywania i analizy danych z uwzględnieniem statystyki opisowej, metody eksperymentalne stosowane w zakresie analizy sztywności różnego rodzaju tektur falistych, wpływ imperfekcji geometrycznych na sztywność struktur falistych, ale także podstawy teoretyczne i numeryczne stosowane w teorii homogenizacji. Co więcej, zakres prac obejmował zarówno symulacje komputerowe, jak i badania

eksperymentalne, w których istotną rolę odgrywały nie tylko aspekty mechaniczne, ale również fizyczne. Z mechanicznego punktu widzenia wykorzystano w symulacjach MES różne pomysły na dyskretyzację tektur falistych oparte zarówno o belkowe, jak i powłokowe elementy skończone. Analizie MES poddano cienkościenne struktury ortotropowe zarówno w zakresie obciążeń o charakterze quasi-statycznym, jak i w aspekcie modelowania ich stateczności.

Wszystkie publikacje wchodzące w skład przedstawionego cyklu, ale także i ich opis wykonany samodzielnie przez Doktoranta zostały napisane prawidłowo od strony językowej i edycyjnej, w sposób komunikatywny i przejrzysty. Sama tematyka rozprawy doktorskiej jest wyróżniająca ze względu na powszechne stosowanie różnych tektur do opakowań we wszystkich branżach handlu. Aspekt użyteczny, zastosowania praktyczne rozprawy, ale także ścisły związek ze zrównoważonym rozwojem wpływają zasadniczo na ogólną ocenę tej rozprawy.

Uwagę Recenzenta zwrócił kompleksowy charakter studium numerycznego zmian sztywności tektury falistej ze względu na zróżnicowane zjawiska eksploatacyjne, środowiskowe oraz pojawiające się imperfekcje geometryczne. Przedstawiony cykl publikacji opatrzonego wstępem bardzo dobrze odzwierciedla temat rozprawy i jest całkowicie monotematyczny, natomiast sam wybór publikacji składających się na rozprawę został dokonany w sposób wyróżniający, gdyż dorobek Doktoranta jest znacznie bogatszy. Co prawda pewna część publikacji ma bardzo wielu autorów, ale wkład Doktoranta do każdej z nich okazał się znaczący. Na uwagę zasługuje duże doświadczenie w zakresie implementacji i stosowania metod numerycznych potwierdzone długim stażem pracy w firmie zajmującej się rozwijaniem oprogramowania z tej dziedziny.

W części krytycznej należy stwierdzić, iż nieco dyskusyjny i mylący jest sam temat rozprawy, gdyż sugeruje on, iż przedmiotem analizy jest homogenizacja samego papieru oraz/lub tektury falistej, a tak naprawdę rozważane jest zagadnienie homogenizacji struktur periodycznych wytworzonych z tych materiałów i jej efektywność. Zawartość i kolejność układu treści nie jest do końca zgodna z oczekiwaniami stawianymi rozprawom doktorskim, gdyż rozprawa nie zawiera np. żadnych podziękowań, natomiast wykaz skrótów zawiera oprócz skrótów również przyjęte oznaczenia, a to nie jest tożsame. Wykaz publikacji stanowiących cykl będący podstawą rozprawy znajduje się przed spisem treści, natomiast oświadczenia współautorów dotyczące ich wkładu w poszczególne publikacje nie wskazują bezpośrednio rzeczywistego wkładu Doktoranta do przedstawionych publikacji. Zastrzeżenia budzi po pierwsze fakt, iż w przedstawionych oświadczeniach różni współautorzy zadeklarowali te same czynności w wybranej pracy. Ponadto, nie ma bezpośrednio wskazanego ilościowego wkładu Doktoranta w przedstawione publikacje. Zdaniem Recenzenta przegląd literatury nie do końca odzwierciedla badania naukowe prowadzone w zakresie własności papieru i jego struktur, np. nigdzie w literaturze nie można znaleźć klasycznych prac z zakresu homogenizacji w tym obszarze, np. M. Ostoja-Starzewski, J. Castro, *Random formation, inelastic response and scale effects in paper*, 2003; <https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1175>; przegląd literatury z zakresu metod homogenizacji też wydaje się niepełny ze względu na brak przywołania jakichkolwiek klasycznych

prac z tej teorii, np. A. Bensoussan, J.L. Lions, G. Papanicolaou, *Asymptotic Analysis for Periodic Structures*. North-Holland, Amsterdam, 1978, czy też monografii T. Lewińskiego i J. Telegi dotyczącej homogenizacji w teorii płyt i powłok (World Scientific Press 1999).

Jakkolwiek ogólna ocena cyklu publikacji, a zatem i rozprawy doktorskiej jest pozytywna, to w dalszych badaniach Doktorant powinien wziąć pod uwagę następujące uwagi krytyczne wymienione w kolejności przedstawionych prac i doprecyzować je w trakcie publicznej obrony.

Publikacja [1] nie zawiera żadnych usystematyzowanych informacji o modelu MES, ani o zbieżności numerycznej modelu; dyskusyjne również może być arbitralne zastosowanie aproksymacji liniowych w przypadku redukcji wszystkich sztywności. Różni współautorzy zgłosili tutaj swój udział w tych samych czynnościach, co Doktorant i nie jest jasne, jaki był rzeczywisty Jego wkład w poszczególne etapy powstawania tej pracy.

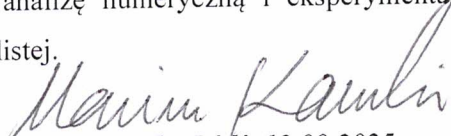
Publikacja [2] nie zawiera jednoznacznej informacji, w jaki sposób dokonano aproksymacji serii danych pochodzących z eksperymentów numerycznych za pomocą przedstawionych krzywych na rys. 12. Jest to kluczowa informacja, gdyż wybrana metoda może znacząco wpływać na charakter uzyskanych wyników.

Badanie wpływu różnych czynników niezależnie od ich natury można było przeprowadzić z wykorzystaniem ogólnie dostępnych narzędzi matematycznych i numerycznych znanych z teorii optymalizacji, tj. analizy wrażliwości konstrukcji. Znormalizowane współczynniki wrażliwości tektury miałyby bardziej ogólny charakter niż konkretne wartości liczbowe i wykresy funkcji zmienności przedstawione w poszczególnych publikacjach.

Dostrzeżone mankamenty i słabsze aspekty cyklu publikacji nie mają jednak zasadniczego wpływu na ogólnie pozytywną ocenę przedstawionej rozprawy doktorskiej.

4. *Wniosek końcowy*

Przedstawiona rozprawa mgr inż. Damiana Mrówczyńskiego 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, a uwagi krytyczne wyrażone w recenzji powinny zostać przedyskutowane w jej trakcie. Recenzent wnioskuje także o wyróżnienie rozprawy doktorskiej, co jest podyktowane dużym dorobkiem naukowym, jaki zgromadził Doktorant nie będąc jak do tej pory związanym z żadną uczelnią, ale także holistycznym podejściem do problemu opartym o analizę numeryczną i eksperymentalną badanej różnorodności struktur wykonanych z tektury falistej.


Marcin Kamiński, Łódź, 12.09.2025 r.