

Dr hab. inż. Dariusz M. Perkowski, prof. PB

Białystok, 4 września 2025 r.

Politechnika Białostocka

Wydział Mechaniczny

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej

Ul. Wiejska 45C, Białystok 15-351

Email: d.perkowski@pb.edu.pl, tel. +48 571 443 034

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Damiana Mrówczyńskiego

„Modelowanie konstytutywne i homogenizacja papieru i tektury falistej”

wykonana pod opieką naukową:

Promotora: prof. UPP dr hab. inż. Tomasz Garbowski, Katedra Inżynierii Biosystemów,

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Anna Knitter-Piątkowska, Instytut Analizy Konstrukcji,

Politechnika Poznańska

1. Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej prof. UPP dr hab. inż. Krzysztofa Koszela o numerze WI.4000.2.2025.

2. Opis zawartości pracy:

Rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Mrówczyńskiego pt. „*Modelowanie konstytutywne i homogenizacja papieru i tektury falistej*” została przygotowana w formie cyklu sześciu publikacji naukowych, które łącznie tworzą spójną koncepcję badawczą, obejmującą zarówno eksperymentalną identyfikację zjawisk degradacji, jak i ich opis w ujęciu numerycznym z wykorzystaniem homogenizacji.

Praca [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, stanowi szczegółową analizę wpływu przegniecenia na właściwości tektury falistej. Autorzy w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych poddali próbki zgniataniu w zakresie 10–70% pierwotnej grubości, a następnie wykonali testy ECT, BNT, SST i TST przy pomocy maszyny BSE. Wyniki wykazały, że to właśnie parametr SST najlepiej odwzorowuje stopień uszkodzenia ($R^2 = 0,977$), a spadki ECT i grubości pozostają liniowo skorelowane z poziomem przegniecenia ($R^2 > 0,96$). Uzupełnieniem była homogenizacja numeryczna i analizy MES, które pozwoliły określić zdegradowane macierze sztywności. Praca

ta wprowadza użyteczny wskaźnik przemysłowy – szybki pomiar SST jako ekwiwalent stopnia przegniecenia i pochodnej utraty nośności.

Praca [2]: Garbowski, T., Knitter-Piątkowska, A., Mrówczyński, D. (2021). Numerical Homogenization of Multi-Layered Corrugated Cardboard with Creasing or Perforation. *Materials*, 14(14), 3786, rozwija metodę homogenizacji Biancoliniego, rozszerzoną o ścinanie transversalne. Autorzy przeanalizowali wpływ bigowania i perforacji (układy 2/6, 4/4, 6/2 mm, orientacja 0° – 90°) na właściwości mechaniczne tektury trzy- i pięciowarstwowej. Wskazano jednoznacznie, że orientacja perforacji determinuje, które składowe macierzy A, D i R ulegają największej degradacji (np. A22, D22, R55 przy perforacjach w kierunku MD). Poziom redukcji zależy od rodzaju nacięcia – od $<10\%$ dla perforacji 2/6 mm do ponad 50% dla perforacji 6/2 mm. W przypadku współwystępowania bigowania degradacja była jeszcze większa.

Praca [3]: Mrówczyński, D., Knitter-Piątkowska, A., Garbowski, T. (2022). Numerical Homogenization of Single-Walled Corrugated Board with Imperfections. *Applied Sciences*, 12(19), 9632, koncentruje się na roli imperfekcji geometrycznych w tekturze trzywarstwowej. Przeanalizowano sześć kształtów wyboczeń odpowiadających różnym trybom obciążeń. Największe spadki odnotowano dla sztywności giętnych D11 ($-9,5\%$) i D22 ($-5,4\%$), podczas gdy A33 pozostało praktycznie niezmienione ($-0,5\%$). Co najważniejsze, wykazano, że pojedyncza postać imperfekcji – wyboczenie przy ściskaniu w kierunku poprzecznym – może być traktowana jako reprezentatywna, co pozwala zredukować liczbę analiz przy zachowaniu wysokiej jakości predykcji.

Praca [4]: Mrówczyński, D., Garbowski, T. (2023). Influence of Imperfections on the Effective Stiffness of Multilayer Corrugated Board. *Materials*, 16(3), 1295, przenosi rozważania na tekturę pięciowarstwową typu EB. Autorzy zbadali dwa typy imperfekcji (odpowiadające ściskaniu w MD i CD) przy czterech poziomach intensywności oraz przy dziesięciu wariantach przesunięcia fal względem siebie. Największą degradację zaobserwowano dla sztywności D11, sięgającą 14%. Wyniki jasno wskazują, że odpowiedni dobór offsetu fal może stanowić narzędzie optymalizacji układu warstw, pozwalając sterować właściwościami mechanicznymi struktury.

Praca [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, skupia się na zagadnieniach eksperymentalno-numerycznych związanych z testem czteropunktowego zginania. Analizy wykazały, że sztywność tektury asymetrycznej zależy w istotnym stopniu od sposobu ułożenia próbki w maszynie badawczej.

Różnice w sztywności mogą sięgać nawet 17% przy silnie asymetrycznych przekrojach (fala EC). W pracy jednoznacznie podkreślono wagę prawidłowej kontroli warunków brzegowych – zarówno w badaniach laboratoryjnych, jak i w walidacji modeli numerycznych.

Praca [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, zamyka cykl badań, analizując wpływ temperatury (10–60 °C) i wilgotności względnej (30–90%) na właściwości mechaniczne sześciu rodzajów tektury (3 trzywarstwowe i 3 pięciowarstwowe). W sumie wykonano 1290 pomiarów przy użyciu maszyny BSE. Wyniki przedstawiono w formie znormalizowanych macierzy, które wyraźnie pokazują, że najbardziej niekorzystne są warunki niskiej temperatury i wysokiej wilgotności, podczas gdy wysokie temperatury i niska wilgotność sprzyjają utrzymaniu parametrów mechanicznych. Otrzymane mapy degradacji stanowią praktyczne narzędzie do prognozowania trwałości opakowań w warunkach magazynowania i transportu.

Całość cyklu tworzy spójny i konsekwentnie rozwijany program badawczy, w którym każdy artykuł stanowi istotny etap budowania metodyki predykcji właściwości tektury falistej. Rozprawa wnosi zarówno wartościowy wkład naukowy, jak i wyraźny potencjał aplikacyjny, obejmujący diagnostykę przegniecenia, mapowanie wpływu perforacji i bigowania, redukcję kosztów obliczeniowych dzięki imperfekcji reprezentatywnej, wskazania dotyczące poprawności warunków brzegowych oraz kompleksowe uwzględnienie oddziaływań środowiskowych.

3. Oryginalność pracy

Oryginalność rozprawy mgr inż. Damiana Mrówczyńskiego polega na całościowym i konsekwentnym ujęciu problematyki degradacji właściwości mechanicznych tektury falistej w kontekście czynników technologicznych i eksploatacyjnych, a następnie na opracowaniu jednolitej metodyki ich prognozowania przy użyciu homogenizacji numerycznej. Autor nie ogranicza się do pojedynczych zagadnień, jak miało to miejsce w wielu wcześniejszych pracach, lecz tworzy spójny program badawczy, który obejmuje pełne spektrum rzeczywistych oddziaływań: od przegniecenia, przez bigowanie i perforacje, aż po niedoskonałości geometryczne oraz wpływ warunków klimatycznych (temperatura, wilgotność).

Nowatorski charakter pracy widoczny jest w kilku wymiarach. Po pierwsze, autor wykazał, że stopień przegniecenia można w prosty i wiarygodny sposób oszacować poprzez pomiar parametru SST, co stanowi propozycję praktycznego narzędzia diagnostycznego, dotychczas nieopisanego w literaturze w tak jednoznaczny sposób. Po drugie, wprowadzone mapowanie degradacji sztywności w funkcji perforacji i bigowania – z rozpisaniem na składowe macierzy

A, D i R – daje projektantom bezpośrednie narzędzie do oceny skutków technologicznych nacięć, bigów i przesunięć warstw. Po trzecie, wskazanie pojedynczej „imperfekcji reprezentatywnej”, która pozwala zredukować koszt obliczeń przy zachowaniu jakości prognoz, jest rozwiązaniem o istotnym znaczeniu praktycznym i metodologicznym, umożliwiającym szybkie analizy inżynierskie.

Wkładem oryginalnym jest również wykazanie, że warunki brzegowe w testach czteropunktowego zginania mają zasadniczy wpływ na wyniki, a dla przekrojów asymetrycznych różnice mogą sięgać kilkunastu procent. Takie wskazanie stanowi nie tylko uzupełnienie luk w literaturze, ale także bezpośrednią wskazówkę metodologiczną dla przyszłych badań i walidacji modeli numerycznych. Z kolei opracowanie szerokiej bazy eksperymentalnej obejmującej 1290 pomiarów w zróżnicowanych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych i przedstawienie wyników w formie znormalizowanych macierzy jest pierwszą tak systematyczną próbą stworzenia „map degradacji” pozwalających prognozować właściwości mechaniczne tektury w praktycznych scenariuszach magazynowania i transportu. Oryginalność rozprawy polega więc na tym, że autor nie tylko rozwija i stosuje istniejące metody homogenizacji, lecz także nadaje im nową funkcję – czyni z nich narzędzie diagnostyczne, prognostyczne i projektowe. W ten sposób powstał spójny model oceny i prognozowania właściwości mechanicznych tektury falistej, integrujący wyniki eksperymentalne i numeryczne w jedną metodykę inżynierską. Tak ujęte podejście wypełnia istniejącą lukę w literaturze i posiada wyraźny potencjał wdrożeniowy, odpowiadając na potrzeby przemysłu opakowaniowego poszukującego rozwiązań ekologicznych, efektywnych i łatwych w implementacji.

4. Wartości użytkowe pracy

Wartości użytkowe rozprawy mgr inż. Damiana Mrówczyńskiego są bardzo wyraźnie zarysowane i mają bezpośrednie przełożenie na praktykę inżynierską oraz przemysł opakowaniowy. Autor nie ograniczył się do aspektów czysto teoretycznych, lecz opracował zestaw narzędzi i metod pozwalających na szybkie i wiarygodne prognozowanie właściwości mechanicznych tektury falistej w rzeczywistych warunkach produkcji i eksploatacji.

Najważniejszą wartością użytkową jest zaproponowanie prostych wskaźników diagnostycznych. Wykazanie, że parametr sztywności na ścinanie (SST) w sposób jednoznaczny odzwierciedla poziom przegniecenia, stanowi niezwykle cenne narzędzie dla przemysłu. Oznacza to, że producent może – bez stosowania kosztownych analiz numerycznych i rozbudowanych badań – szybko ocenić stopień degradacji materiału i

powiązaną z tym utratę nośności. Jest to przykład praktycznej aplikacji wyników badań, która może być wdrożona w procesach kontroli jakości.

Drugim elementem o dużej wartości użytkowej jest opracowanie map degradacji sztywności w funkcji perforacji i bigowania. Dzięki nim możliwe jest przewidywanie, jak różne rozwiązania technologiczne (np. rodzaj i orientacja perforacji) wpłyną na parametry mechaniczne gotowego opakowania. Tego typu narzędzie może być bezpośrednio zastosowane na etapie projektowania i optymalizacji konstrukcji pudeł, umożliwiając wybór rozwiązania minimalizującego utratę sztywności przy zachowaniu funkcjonalności.

Trzecim istotnym osiągnięciem o walorze praktycznym jest wskazanie tzw. imperfekcji reprezentatywnej, która pozwala w obliczeniach ograniczyć liczbę analizowanych przypadków przy zachowaniu wysokiej jakości wyników. Daje to wyraźne oszczędności czasowe i obliczeniowe, a jednocześnie dostarcza sprawdzonych procedur, które można stosować w narzędziach inżynierskich typu CAD/CAE.

Na uwagę zasługuje również analiza warunków brzegowych w testach czteropunktowego zginania, pokazująca, że błędne ułożenie próbki czy podpór może istotnie zaburzyć wyniki pomiarów. Tego typu wnioski mają bezpośrednie znaczenie dla laboratoriów badawczych i firm zajmujących się certyfikacją opakowań, pozwalając na uniknięcie błędów interpretacyjnych i zapewnienie większej wiarygodności danych eksperymentalnych.

Ostatnim, lecz bardzo ważnym aspektem jest opracowanie szerokiej bazy danych dotyczącej wpływu temperatury i wilgotności na właściwości mechaniczne tektury. Powstałe w ten sposób „mapy degradacji” można traktować jako gotowe narzędzie prognostyczne w logistyce i transporcie. Dzięki nim można przewidzieć, jak w określonych warunkach klimatycznych zmieni się wytrzymałość opakowania, co pozwala producentom i użytkownikom na lepsze planowanie procesów przechowywania i dystrybucji towarów.

Wartością użytkową pracy jest zatem nie tylko opracowanie nowych modeli numerycznych, lecz także ich jasne zakotwiczenie w praktyce przemysłowej. Rozprawa wnosi bezpośrednie korzyści w zakresie kontroli jakości, projektowania opakowań, optymalizacji procesów produkcyjnych, a także prognozowania trwałości i bezpieczeństwa w realnych warunkach eksploatacji.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Mrówczyńskiego jest pracą oryginalną, dobrze udokumentowaną i o dużej wartości praktycznej. Autor w sposób spójny i logiczny prowadzi wywód od badań eksperymentalnych, poprzez rozwój modeli numerycznych, aż do stworzenia narzędzi prognostycznych przydatnych w inżynierii

opakowań. Rozprawa jest napisana przejrzysto, zilustrowana licznymi wykresami i tabelami, a uzyskane wyniki mają zarówno walor naukowy, jak i aplikacyjny. Ogólna ocena pracy jest wysoka.

Mimo to kilka kwestii wymaga szerszej refleksji i mogłoby stanowić podstawę do dyskusji z Autorem:

1. Czy przyjęcie modeli liniowo-sprężystych nie ogranicza możliwości praktycznego wykorzystania wyników w warunkach długotrwałych obciążeń i zmiennych warunków klimatycznych, gdzie istotne mogą być nieliniowości, plastyczność włókien i pełzanie kleju?
2. Na ile zaproponowana „imperfekcja reprezentatywna” pozostaje skuteczna w przypadku innych typów fal (np. C, K) lub większych deformacji, gdy lokalne uszkodzenia mogą odgrywać większą rolę?
3. Czy analizując wpływ perforacji i bigowania na właściwości tektury, warto byłoby rozszerzyć badania o szerszy zestaw wzorów nacięć, aby lepiej odwzorować praktykę przemysłową?
4. W jakim stopniu opracowane mapy degradacji związane z temperaturą i wilgotnością mogłyby zostać uzupełnione o zjawiska cykliczne i efekt starzenia materiału, które w rzeczywistych warunkach eksploatacji prowadzą do kumulacji uszkodzeń?
5. Czy połączenie opracowanych modeli homogenizacyjnych z kryteriami wytrzymałościowymi i modelami inicjacji uszkodzeń nie zwiększyłoby jeszcze bardziej ich praktycznej przydatności w projektowaniu niezawodnych opakowań?
6. Jakie są możliwości integracji zaproponowanych procedur z istniejącymi narzędziami CAD/CAE stosowanymi w przemyśle, tak aby przejście od modelu badawczego do wdrożeniowego było możliwie płynne?

Rozprawa została przygotowana poprawnie pod względem językowym i edytorskim, a tekst jest przejrzysty i klarowny. Pojedyncze drobne niekonsekwencje edycyjne nie wpływają na wartość merytoryczną, jednak ich korekta podniosłaby końcowy poziom opracowania.

6. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Biorąc pod uwagę podstawowy charakter przedstawionych badań kwalifikowałbym ją do dziedziny nauk inżyneryjno-technicznych w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna* (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669). **Biorąc powyższe pod uwagę, stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Damiana Mrówczyńskiego do publicznej obrony.**

W związku z powyższym przedstawiam pozytywną konkluzję i uprzejmie wnoszę o przyjęcie przedmiotowej rozprawy doktorskiej oraz wnioskuję do **Rada Naukowa Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu** o dopuszczenie Pana mgr inż. Damiana Mrówczyńskiego do kolejnych etapów przewodu doktorskiego - Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 roku poz. 478 ze zm.).

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P. Kwasicki', is positioned to the right of the main text block.