

Białystok, 5.09.2019 r.

Prof. dr hab. Oleksandr Jewtuszenko  
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Białostocka  
ul. Wiejska 45C  
15-590 Białystok

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Wodzyńskiego pt.  
**„Przenoszenie fluktuacji termicznych przez przegrodę budowlaną utworzoną z  
periodycznego materiału kompozytowego”**

Podstawa opracowania recenzji: pismo Nr WBiŚ – 297/2019 Dziekana Wydziału  
Budownictwa i Inżynierii Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w  
Warszawie z dn. 29.07.20019 r.

### **Wstęp**

Recenzowana rozprawa doktorska powstała w Katedrze Inżynierii Budowlanej Szkoły  
Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Promotorem pracy jest dr hab. Ewaryst  
Wierzbicki, a promotorem pomocniczym jest dr Dorota Kula.

Głównym celem pracy jest zbadanie za pomocą metod analitycznych zjawiska efektu  
brzegowego pola temperatury w wykonanej z materiału kompozytowego ścianie  
pomieszczenia. Efekt brzegowy w rozprawie doktorskiej zdefiniowany, jako blisko-brzegowe  
tłumienie oscylujących obciążeń temperaturowych.

Biorąc pod uwagę treść i zakres rozprawy doktorskiej, zastosowane metody oraz  
otrzymane rezultaty numeryczne można ją zakwalifikować do dyscypliny naukowej  
*budownictwo*.

### **Zakres i treść rozprawy**

Praca zajmuje 96 stron i składa się ze wstępu, pięciu rozdziałów, wykazu literatury oraz  
streszczeń w j. polskim i angielskim.

We *Wstępie* Doktorant uzasadnia aktualność problematyki badawczej, przedstawia  
przedmiot, cel i zakres badań, formułuje hipotezę badawczą oraz dokonuje przeglądu  
piśmiennictwa z zakresu technik homogenizacji kompozytów i ich zastosowań do zagadnień

przewodnictwa cieplnego. Szczególną uwagę poświęcono stosowanej w rozprawie doktorskiej technice tolerancyjnego uśredniania (TTU), zaproponowanej w pionierskich pracach uczestników zespołu naukowego pod kierownictwem Profesora Czesława Wozniaka.

W rozdziale *drugim* przedstawiono autorski wariant zastosowania TTU do równania nieustalonego przewodnictwa cieplnego typu parabolicznego ze zmiennymi właściwościami cieplno-fizycznymi składowych kompozytu. Kluczowym założeniem opracowanego modelu jest przedstawienie poszukiwanej temperatury  $\theta$  kompozytu postaci sumy dwóch składników: regularnego  $\theta_{reg}$  i residualnego  $\theta_{res}$ . Dwuwymiarowe nieustalone pole temperatury regularnej poszukiwane jest w postaci szeregu Fouriera względem ortogonalnej bazy z nieznanymi funkcjami (*amplitudami*). Rezydualną część pola temperatury przedstawiono w postaci sumy *uśrednionej* temperatury oraz iloczynu funkcji kształtu i tzw. *tolerancyjnej amplitudy fluktuacji*. Opisaną procedurę homogenizacji w rozprawie doktorskiej nazwano *przeformulowaniem*. Jej rezultatem końcowym jest zastąpienie wejściowego równania przewodnictwa cieplnego typu parabolicznego układem równań różniczkowych w pochodnych cząstkowych *rozszerzonego modelu tolerancyjnego* (RMT) składającego się na równanie względem temperatury uśrednionej, skończony układ równań względem amplitud tolerancyjnych oraz nieskończony układ równań względem amplitud szeregu Fouriera.

W przypadku dwuwymiarowej warstwy kompozytowej ogrzewanej ustalonym polem temperatury (a jest to właśnie przykład z rozdziału *czwartego* aplikacyjnego rozprawy) po wyrugowaniu z powyższych równań modelowych amplitud tolerancyjnych otrzymano układ równań różniczkowych zwyczajnych niejednorodnych rzędu drugiego względem temperatury uśrednionej (pojedyncze równanie tzw. *efektywnego przewodnictwa cieplnego*) i amplitud Fouriera (nieskończony układ równań). Rozwiązanie tego ostatniego układu równań w przypadku jednorodnym służy do opisu badanego w rozprawie zjawiska *temperaturowego efektu brzegowego* czyli interakcji kompozytu z zestawem brzegowych fluktuacji temperatury nałożonych na temperaturę uśrednioną.

W rozdziale *trzecim* rozpatrzono przypadek pojedynczej fluktuacji temperatury. Układ równań RMT zawiera wtedy dwa równania różniczkowe zwyczajne niejednorodne rzędu drugiego względem temperatury średniej i amplitudy Fouriera. Rozwiązanie jednorodnego równania względem amplitudy Fouriera pozwala na zbadanie temperaturowego efektu brzegowego. Osobno rozpatrzono przypadki periodycznego nie- i parzystego impulsów z uwzględnieniem zmiany przewodnictwa cieplnego kompozytu w poprzecznym lub

podłużnym kierunkach. W równaniu efektu brzegowego po raz pierwszy nie pominięto składowej, odpowiadającej za tłumienie impulsów.

Rozdział *czwarty* rozprawy doktorskiej poświęcono adaptacji opracowanego w powszednich rozdziałach układu równań RMT do zbadania temperaturowego efektu brzegowego w ścianie pomieszczenia wykonanej z warstwowego dwuskładnikowego materiału kompozytowego o strukturze jednokierunkowo periodycznej (laminat dwufazowy). Rozpatrzono ustalony stan temperaturowy takiego ośrodka, spowodowany różnicą temperatur na jego powierzchniach zewnętrznych. Zgodnie z postawionym celem badawczym przedmiotem rozważań jest analiza transportu przez kompozyt liniowej kombinacji dwóch fluktuacji temperatury: parzystej i parzystej (wariant 1) oraz parzystej i nieparzystej (wariant 2). Dla obu wariantów zapisano w postaci macierzowej zwyczajne równania różniczkowe względem dwóch amplitud Fouriera, będących funkcjami jednej zmiennej przestrzennej, prostopadłej do kierunku uwarstwienia. W przypadku wariantu 1 jest to zwyczajne jednorodne równanie różniczkowe rzędu drugiego o stałych współczynnikach razem z dokładnym rozwiązaniem, które otrzymano przy zadanych warunkach brzegowych. Zawiera ono tłumienie wykładnicze impulsu  $\omega_{exp}$ , zależne od cieplno-fizycznych stałych materiałów obu warstw kompozytu i parametrów nasycenia kompozytu tymi składowymi. Zaznaczono, że za pomocą parametru  $\omega_{exp}$  można zbadać opór termiczny na interfejsach kompozytu oraz szybkość zanikania na nich fluktuacji temperatury.

W przypadku wariantu 2 otrzymane kluczowe równanie różniczkowe jest rzędu czwartego, a odpowiednie równanie charakterystyczne – bikwadratowe, posiadające cztery pierwiastki zespolone. Minimalne wartości części rzeczywistych i urojonych tych pierwiastków zwane są odpowiednio intensywnością tłumienia wykładniczego  $\omega_{exp}$  i rotacyjnego  $\omega_{rot}$ . Ostatnia charakteryzuje szybkość zaniku fluktuacji temperatury.

Obliczenia numeryczne dotyczyły zbadania zależności  $\omega_{exp}$  i  $\omega_{rot}$  od dwóch parametrów wejściowych – względnej przewodności cieplnej  $k$  i nasycenia podstawowej komórki kompozytu jednym ze składników  $\eta$ . Ustalono, że przy ustalonej wartości  $\eta$  tłumienie wykładnicze  $\omega_{exp}$  szybko zwiększa się wraz ze wzrostem parametru  $k$ , osiągając wartość największą, gdy składniki laminatu posiadają zbliżone przewodności cieplne. Przy dalszym zwiększeniu  $k$  tłumienie wykładnicze nieznacznie maleje. Analiza numeryczna dotycząca tłumienia rotacyjnego w rozprawie doktorskiej jest mało obszerna, a jej rezultaty zaprezentowano w postaci tylko jednego wykresu (Rys. 4.5).

W rozdziale *piątym* Doktorant przedstawił w sposób syntetyczny najważniejsze uzyskane wyniki badawcze oraz sformułował wnioski końcowe i, co rzadko jest widziane w pracach doktorskich, przedstawił swoje uwagi dotyczące otrzymanych rezultatów.

*Wykaz literatury przedmiotu* jest obszerny i zawiera 154 pozycji bezpośrednio związanych z problematyką rozprawy doktorskiej.

### **Ocena merytoryczna pracy**

W rozprawie doktorskiej podjęto ambitne i trudne zagadnienie zbudowania modelu matematycznego do analizy zaburzeń (fluktuacji) nieustalonego pola temperatury przy jego transporcie przez ośrodek kompozytowy. Trudność podjętego zagadnienia polega na złożoności samego zjawiska wygaszania brzegowych fluktuacji temperatury w kierunkach prostopadłych do kierunków periodyczności kompozytu (znanego w literaturze naukowej, jako *efekt brzegowy*), na które ma wpływ wiele czynników, m.in. takich jak zmienne w przypadku ogólnym właściwości cieplno-fizyczne składników, obciążenie termiczne powierzchni zewnętrznych i warunki brzegowe na interfejsach, a także struktura geometryczna kompozytu. Oprócz charakteru naukowego, nie mniej istotne jest znaczenie użyteczne rozwiązywanego zagadnienia.

W pracy przedstawiono szeroki i rzetelny przegląd aktualnych badań z tego zakresu, obejmujący zarówno stan wiedzy i stosowaną metodologię.

W ramach rozprawy został zaproponowany wariant rozszerzonego modelu tolerancyjnego stanowiący równoważne przeformułowanie równania nieustalonego przewodnictwa cieplnego typu parabolicznego. Stanowi ono sprzężony układ równań różniczkowych cząstkowych rzędu drugiego względem uśrednionej temperatury, tolerancyjnych amplitud fluktuacji temperatury na powierzchniach nieciągłości kompozytu oraz amplitud w rozwinięciu temperatury w szereg Fouriera. Na ustaleniu postaci analitycznej tych ostatnich skupioną główną uwagę Doktoranta. Po wyeliminowaniu amplitud tolerancyjnych otrzymano układ jednorodnych równań różniczkowych zwyczajnych względem poszukiwanych amplitud. Rozwiązanie takiego układu otrzymano w przypadkach pojedynczych lub współpracujących ze sobą fluktuacji.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono wiele rezultatów obliczeń numerycznych z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania. Potwierdzają one postawioną w rozprawie doktorskiej tezę badawczą o istnieniu dwóch rodzaju tłumienia impulsów temperatury podczas ich transportu (przemieszczenia) przez ściankę, wykonaną z dwufazowego

laminowanego materiału kompozytowego. Są to tłumienia wykładnicze i rotacyjne, zależne od dwóch bezwymiarowych parametrów – względnych przewodnictwa cieplnego i nasycenia materiału kompozytu. Przy ustalonej wartości nasycenia i zwiększeniu względnego przewodnictwa cieplnego kompozytu oba rodzaje tłumienia zwiększają się, osiągając wartości maksymalne wtedy, gdy przewodności cieplne składowych kompozytu są zbliżone.

Struktura pracy jest logiczna, a praca napisana jest poprawnym językiem naukowym.

### Uwagi dyskusyjne

- 1) Strona edytorska pracy budzi pewne zastrzeżenia. Brak wykazu oznaczeń znacznie utrudnia jej lekturę, w wielu miejscach o znaczeniu symboli matematycznych, stosowanych we wzorach czytelnik może się tylko domyślać, są przypadki stosowania różnych symboli do oznaczenia tej samej wielkości, niektóre z tych wielkości zawierają w jednym miejscu rozprawy wskaźniki górne w innym dolne, trudno odróżnić zapisy macierzowe i skalarnie, stosowane w niektórych wzorach, są powtórzenia tekstowe (przykładowo, w założeniach na str. 11 i 12), przy zapisie równań różniczkowych brak wskazania obszarów zmiany argumentów poszukiwanych wielkości, jedne i te same parametry lub wielkości są pisane i jako skalary i jako funkcje, podpisy pod wykresami nie zawierają informacji o wartościach wszystkich parametrów wejściowych (przykładowo, charakterystycznym wymiarze  $\lambda$  komórki kompozytu), na rys. 4.1 pokazano bryłę kompozytową o długości  $2H_2$  z napisem  $H_2 \rightarrow \infty$ , na rys. 4.2 zaprezentowano fragment ściany pomieszczenia, odniesiony do układu kartezjańskiego  $Oz_1z_2z_3$ , a w pierwszym zdaniu pod tym rysunkiem Doktorant wymienia kierunek  $x^2$ , itd.
- 2) Teza rozprawy (hipoteza robocza na str. 14) zawiera niezdefiniowane wcześniej parametry  $(k_I, k_{II}, \eta_I, \eta_{II})$ . Niejasno, co miał na myśli Doktorant, pisząc: "Wartości graniczne ilorazu przewodnictw dla  $k \rightarrow 0$  i  $k \rightarrow \infty$  są nieskończone", tak jak parametr  $k$  i jest tym samym ilorazem przewodnictw. Również niejasne jest stwierdzenie Doktoranta o tym, że "Przypadek  $k = k(\eta) = 1$  oznacza, że intensywność wykładnicza jest maksymalna dla zbliżonych własności przewodzących kompozytu". Moim zdaniem, przypadek ten świadczy tylko o jednakowych przewodnictwach cieplnych składowych kompozytu.

- 3) W rozprawie nie jednorazowo podkreślano, że rozpatruję się nieustalone pole temperatury, opisywane równaniem przewodnictwa cieplnego typu parabolicznego. Natomiast w aplikacyjnym rozdziale czwartym rozpatrywane jest dwuwymiarowe zagadnienie stacjonarne. Doktorant na str. 46 piszę: " Ponadto pole temperatury  $\theta$  nie zależy od czasu...", a niżej nadmieniam, że: "Takie warunki przewodnictwa ciepła matematycznie wyraża zagadnienie brzegowe dla parabolicznego równania przewodnictwa ciepła". Moim zdaniem, praca by tylko wygrała, gdyby od początku rozpatrywany był eliptyczny (ustalony) typ równania, z następną odpowiednią aplikacją..
- 4) Główna moja uwaga dotyczy pewnego „przesycenia” pracy teoretycznymi rozważaniami i niedostateczną ilością wniosków praktycznych takich, którzy umożliwiliby na przykład, konstruktorowi wiarygodną ocenę poziomu temperatury kompozytu przy zadanym obciążeniu cieplnym. Z mojego punktu widzenia, trafniej było by rozpatrzeć jeden-dwa przykłady z rzeczywistym materiałem kompozytowym o znanych właściwościach. Należałoby ocenić nie tylko wpływ bezwymiarowych parametrów na intensywność fluktuacji temperatury, ale również zmianę samej temperatury pod wpływem tych fluktuacji. Dałoby to bogaty materiał dla wnioskowania praktycznego.
- 5) Analiza otrzymanych w pracy wyników w niektórych miejscach ma charakter formalny. Po pierwsze, Autor nie podaje motywacji do wyboru tego czy innego zagadnienia. Z jakim problemem technicznym jest ono związane, czemu geometria kompozytu taka a nie inna, czym spowodowany jest wybór tej czy innej postaci funkcji kształtu (impulsu fluktuacji)? Listę takich zapytań można by było przedłużyć.
- 6) W niektórych miejscach pracy brak jest powołań na pozycje literaturowe, które są źródłem równań podstawowych. Nawet klasyczne równanie przewodnictwa cieplnego na str. 22 zapisane jest bez autorstwa. Za wyjątkiem przeglądu prac, w części głównej doktoratu praktycznie nie ma powołań na rezultaty innych autorów.
- 7) Zjawisko temperaturowego efektu brzegowego w rozprawie doktorskiej zostało zbadane w ramach rozszerzonego modelu tolerancyjnego, który jest pewnym uogólnieniem znanego i aprobowanego modelu tolerancyjnego. W celu weryfikacji otrzymanych rozwiązań należałoby przeprowadzić analizę porównawczą otrzymanych za ich pomocą rezultatów. W tym kontekście brakuje również przejść granicznych do znanych w literaturze naukowej rozwiązań. Rozpatrywane w rozdziale piątym dwuwymiarowe stacjonarne zagadnienie przewodnictwa cieplnego bez problemu można byłoby rozwiązać

metodami numerycznymi i porównać otrzymane rozkłady temperatury z odpowiednimi rezultatami teoretycznymi.

### **Wniosek końcowy**

Problematyka badawcza ocenianej rozprawy doktorskiej poświęcona jest analitycznemu modelowaniu zjawiska temperaturowego efektu brzegowego w kompozytach. Praca jest wykonana na wysokim poziomie naukowym i reprezentuje szeroki wachlarz zagadnień z zakresu budowy adekwatnych modeli do zbadania stanu temperaturowego w pomieszczeniach ze ścianami kompozytowymi, wykonanymi z materiałów o złożonych właściwościach cieplno-fizycznych.

Doktorant wykazał się dużą umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a osiągnięte oryginalne wyniki są tego potwierdzeniem. O wiarygodności otrzymanych rezultatów świadczy ich opublikowanie w postaci trzech artykułów naukowych w czasopiśmie "Mechanics and Mechanical Engineering".

Moje uwagi krytyczne nie zmniejszają naukowej wartości pracy, a noszą raczej charakter doradczy. W pracy doktorskiej otrzymano rozwiązanie nowego, ważnego z teoretycznego i praktycznego punktu widzenia problemu naukowego. Otrzymane rezultaty mogą znaleźć szerokie zastosowanie w budownictwie, inżynierii lądowej oraz mechanicznej. Dlatego uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Ł. Wodzyńskiego spełnia warunki określone w obowiązującej Ustawie o tytule naukowym i stopniach naukowych i może stanowić podstawę o ubieganie się przez niego o stopień naukowy doktora nauk technicznych. Wnoszę o dopuszczenie jej do obrony publicznej.

