

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgra inż. El Mehdi Ablaoui

pt. „Structural behavior of sandwich panels under fire conditions”

Promotor: dr hab. inż. Zbigniew Pozorski, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Michał Malendowski

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo Pana Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej, prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy, z dnia 18.06.2025 r.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

2.1. Struktura pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska napisana jest w języku angielskim. Obejmuje 133 strony tekstu głównego, podzielonego na 6 rozdziałów oraz 40 stron zawierających streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, spis oznaczeń, spis rysunków, spis tabel, bibliografię oraz załączniki A, B i C, które są uzupełnieniem głównej części rozprawy. Doktorant zawarł w pracy 78 referencji, którymi są artykuły naukowe, rozdziały w monografiach, materiały konferencyjne, książki, raporty z badań, normy projektowe i rozprawy doktorskie.

2.2. Krótkie przedstawienie treści rozprawy

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie do tematu, przedstawia luki badawcze, motywację do podjęcia tematu, cele pracy oraz stawia dwie hipotezy badawcze. Omówiono w nim też krótko zawartość pracy.

W rozdziale drugim dokonano przeglądu literatury tematu. Przedstawiono w nim panele warstwowe w różnych wariantach konstrukcyjnych, opisano rozwój temperatury w trakcie pożaru i sposób jej modelowania. Przedstawiono także normy dotyczące badań ogniowych elementów konstrukcyjnych, w tym paneli warstwowych. Przedstawiono literaturę dotyczącą zachowania paneli warstwowych w warunkach ogniowych, a także jej poszczególnych składników. Dużo uwagi poświęcono tu wełnie mineralnej, która jest składnikiem

analizowanych w pracy paneli warstwowych oraz sposobów modelowania dyfuzyjności cieplnej materiałów porowatych. Ostatecznie Autor przedstawia literaturę w zakresie termomechanicznego modelowania paneli warstwowych z użyciem metody elementów skończonych. Przegląd literatury jest dobrze zorganizowany, zawiera całą tematykę analizowaną w dalszej części pracy.

Rozdział trzeci dotyczy badań wełny mineralnej w temperaturze wzrastającej stopniowo od 21 do 750°C, których celem jest określenie dyfuzyjności cieplnej tego materiału. Doktorant zaprojektował badania, w których prostopadłościenna próbka materiału ogrzewana jest na jednej powierzchni. W próbce, na różnych głębokościach, umieszczono 7 elementów mierzących jej temperaturę w sposób ciągły, co pozwoliło określić rozkład temperatury w próbce na odcinku od ogrzewanej powierzchni do powierzchni naprzeciwległej, w relacji do czasu. Rozważono dwojaki układ próbek: z prostopadłym bądź równoległym układem włókien wełny w stosunku do kierunku przepływu ciepła. Dzięki temu można było określić dyfuzyjność wełny mineralnej w odniesieniu do jej anizotropii. W pracy zawarto oryginalnie pomierzone wyniki zmian temperatur obserwowanych punktów próbki w czasie, a także wyniki dotyczące zmian dyfuzyjności materiału wraz ze zmianami temperatury – w poszczególnych punktach oraz uśrednione dla każdej próbki. W tej części pracy zbadano też wpływ spalania spoiwa wełny, które występuje podczas ogrzewania, poprzez badania na próbkach w stanie fabrycznym i powtórne ich badania po uprzednim wystudzeniu do temperatury pokojowej. Ostatecznie, uzyskane wartości (jak pisze Autor) dyfuzyjności posłużyły jako dane do budowy jednowymiarowego modelu numerycznego przewodnictwa cieplnego wełny mineralnej. Obliczenia z temperaturowymi danymi brzegowymi pozyskanymi z pomiarów w skrajnych punktach doprowadziły do bardzo wysokiej zgodności relacji temperatura-czas w pozostałych punktach pomiaru temperatury.

W rozdziale czwartym opisano badania doświadczalne czterech ścian wykonanych z paneli warstwowych, w warunkach temperatury narastającej stopniowo do około 1100°C po jednej stronie badanej ściany. Dwie ściany zbudowano z tych samych płyt, a dwie kolejne z innych, odpowiednio z cieńszą warstwą wełny ale z większym ciężarem objętościowym oraz z cieńszą warstwą wełny o mniejszym ciężarze objętościowym. Testy trwały od około 2h do około 3,5h. Po stronie nieogrzewanej na ścianie zamocowano czujniki przemieszczeń i czujniki temperatury. W tym rozdziale przedstawiono także analizę dotyczącą zachowania termicznego paneli. Przedstawiono wykresy temperatur pomierzonych w trakcie testu po nieogrzewanej stronie. Następnie opisano model numeryczny pojedynczej płyty, zbudowany w programie Abaqus i sprawdzono zgodność odpowiedzi termicznej płyty w eksperymencie i w modelu MES.

Rozdział piąty zawiera opis modelu numerycznego całej ściany poddanej badaniom ogniowym. Jest to zaawansowany model, w którym połączenie okładzin z rdzeniem płyty modelowane jest za pomocą kontaktu, umożliwiającego uzyskanie efektu delaminacji. Parametry modelu kontaktu odniesiono do wykonanych w ramach pracy doktorskiej testów rozrywania połączenia klejonego (klej poliuretanowy) płyty stalowej i wełny mineralnej, na podstawie których określono wartość separacji inicjującej delaminację. Opracowany ostatecznie model kontaktu uwzględnia lokalny spadek transmisji ciepła pomiędzy warstwami na skutek delaminacji, jednak w miejsce przerwanej transmisji poprzez kontakt zdefiniowano radiację termiczną. Innym wyzwaniem w definicji modelu było ustalenie warunków

brzegowych dlatego wykonano numeryczne badania wstępne wpływu sposobu podparcia brzegów płyty na jej przemieszczenia. Jednakże nie do końca wiadomo jak wnioski z tej analizy wykorzystano w definicji lub analizie wyników modelu docelowego ściany z paneli warstwowych. W modelu docelowym zastosowano podpory typu 'encastre', podpory sprężyste ('bolts') w miejscach wkrętów oraz połączenia sprężyste między płytami. Model obciążono na jednej płaszczyźnie przyrostami temperatury, odpowiadającymi temperaturze zadanej w testach w komorze ogniowej. Wyznaczono przemieszczenia płyt po stronie nieogrzewanej i porównano je z wartościami pomierzonymi w laboratorium, w testach 1 i 2 bo modelom z tych testów odpowiada model numeryczny.

W rozdziale szóstym zamieszczono podsumowanie pracy.

2.3. Ocena aktualności i znaczenia podjętych badań

Własności mechaniczne konstrukcji budowlanej zmieniają się zasadniczo warunkach pożaru, a zbyt krótki czas odporności pożarowej może zagrozić bezpieczeństwu użytkowników. Projekt budowlany musi zawierać określenie klasy pożarowej danego budynku lub/i klasy odporności ogniowej jego elementów. Odporność ta jest wyrażona w minutach. Jej określenie dla danego typu konstrukcji lub elementów wymaga specjalistycznych badań laboratoryjnych, przeprowadzanych na zlecenie dostawców systemów konstrukcyjnych.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wpisana w tę tematykę, jednak nie tylko w zakresie badań pewnego rozwiązania konstrukcyjnego, ale również w zakresie budowy wiarygodnego modelu numerycznego tego rozwiązania, poddanego działaniu temperatury pożarowej. Badania laboratoryjne ściany testowej wykazały istotne efekty lokalne w panelach, które zaburzają powtarzalność wyników. Tak skomplikowane zachowanie obiektu badawczego wymaga zaawansowanych narzędzi analizy. Zaproponowany przez Doktoranta model numeryczny zawiera modele materiałowe oraz warunki brzegowe zależne od temperatury, a także skomplikowany model kontaktu pomiędzy warstwami płyt, również zależny od aktualnego, lokalnego ich stanu. Tak podjęty temat pozwolił na stworzenie modelu, który może być używany do przewidywania zachowania mechanicznego paneli warstwowych z izolacją z wełny mineralnej w wysokiej temperaturze. Wobec ciągle powstających nowych rozwiązań konstrukcyjnych i rozwoju możliwości zaawansowanego modelowania numerycznego, temat podjęty przez Doktoranta należy uznać za aktualny, wartościowy naukowo i inżyniersko, i z wysokim potencjałem dalszego rozwoju.

3. Szczegółowa ocena rozprawy

3.1 Ocena merytoryczna i dyskusja

Przedstawione w rozdz. 3 badania termiczne wełny mineralnej dostarczają ciekawych informacji o tym materiale. Badania przeprowadzone są metodycznie. Dwie próbki są tak samo ułożone w piecu, a jedna inaczej, co umożliwiło sprawdzenie powtarzalności wyników, ale też wpływu anizotropii materiału na wynik. Doktorant zauważył również efekt nagłego, krótkotrwałego wzrostu temperatury wewnątrz próbki i proponuje Metodę III, z aproksymacją danych, do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej materiału, która eliminuje wpływ tego efektu.

Model ten jest oryginalną propozycją Doktoranta. Rozdział kończy się pozytywną weryfikacją uzyskanych wyników dotyczących dyfuzyjności w jednowymiarowym modelu badanej próbki wełny mineralnej. Uzyskano wysoką zgodność odpowiedzi termicznej modelu numerycznego z wartościami temperatur pomierzonymi wewnątrz próbki.

Badania ogniowe ścian wykonanych z paneli warstwowych dostarczają wielu cennych informacji dotyczących ich zachowania się w warunkach pożaru. Wykonane w ramach pracy doktorskiej badania są dobrze opisane i zilustrowane schematami, choć zabrakło informacji o typach użytych czujników pomiarowych i częstotliwościach próbkowania. Wykorzystanie trzech typów paneli pozwoliło wykazać, że w badanej grupie grubość warstwy wełny mineralnej ma największe znaczenie dla izolacyjności termicznej płyty w warunkach pożarowych. W rozdziale 4 opisano model numeryczny pojedynczej płyty, porównano jego odpowiedź termiczną do odpowiedzi pomierzonych eksperymentalnie i dzięki temu uzyskano model płyty, który mógł być następnie użyty w modelu numerycznym całej ściany. Takie podejście hierarchiczne w budowie skomplikowanych modeli numerycznych jest bardzo rozsądne. Trzeba zaznaczyć, że otrzymano dosyć wysoką zgodność relacji temperatura-czas uzyskanych eksperymentalnie i numerycznie (rys. 48-50). Dobrze by było wyznaczyć współczynnik korelacji liniowej dla każdego kompletu krzywych, można by było wówczas ocenić ilościowo ich podobieństwo.

W rozdziale 5 zamieszczono porównanie przemieszczeń pomierzonych w wybranych punktach modeli w testach 1 i 2 z przemieszczeniami wyznaczonymi w tych punktach w modelu numerycznym (rys. 75-94). Można na tych wykresach zauważyć niskie podobieństwo przemieszczeń pomierzonych w punktach B-I w testach 1 i 2. Wydawać by się mogło, że skoro modele w testach 1 i 2 zbudowane są tak samo, to odpowiedź przemieszczeniowa powinna być bardzo podobna, jednak tak nie jest. Co prawda wszystkie punkty, parami, wykazują ten sam trend zachowania, tzn. przemieszczają się w te same strony (z wyjątkiem punktu I), tzn. punkt A w obu testach przemieszcza się w kierunku od ognia, itd., jednak funkcje przemieszczeń uzyskanych w testach 1 i 2 nie są parami podobne. Chodzi tu o pomierzone przemieszczenia punktów D-H, które w teście 1 wykazują znaczne fluktuacje, a w teście 2 widoczny jest bardziej równomierny trend wzrostowy. Pokazuje to różnorodność zachowania płyty warstwowej w warunkach działania wysokiej temperatury, związanej być może z efektami lokalnymi w płytach. Na stronie 131 Doktorant pisze „Improved representation of material response under complex loading conditions could enhance alignment”. Mam jednak tu wątpliwość, ponieważ krzywe eksperymentalne, pokazane np. na rys 79-81 wydają się niemożliwe do powtórzenia w modelu numerycznym. Może raczej wskazuje to potrzebę podjęcia w przyszłości analizy takiego zagadnienia w ujęciu losowym?

W podsumowaniu pracy Doktorant argumentuje, że przyjęte dwie hipotezy badawcze zostały udowodnione i zgadzam się w tym. Docelowy model numeryczny ściany z paneli warstwowych wykazuje zgodność z obserwacjami eksperymentalnymi w zakresie temperaturowym i zgodność trendu zachowania w zakresie przemieszczeniowym. Model ten może być dalej rozwijany i ma potencjał do symulowania innych scenariuszy i przewidywania termomechanicznego zachowania się takiej ściany w warunkach ogniowych. Ponadto, poprzez badania ścian wykonanych z trzech różnych typów paneli Doktorant wskazał, że grubość warstwy izolacyjnej ma największy wpływ na właściwości izolacyjne ściany w warunkach ogniowych. Wniosek ten związany jest z drugą hipotezą pracy.

Do mocnych stron pracy, poza udowodnieniem przyjętych hipotez, należy m.in. zgodność zaprojektowanych badań eksperymentalnych z odpowiednimi normami. W zakresie modelowania numerycznego mocną stroną jest podejście hierarchiczne, w którym niektóre aspekty modelu rozważane są osobno, w prostszych modelach (np. warunki brzegowe lub parametry materiałowe panelu). Doktorant wykazał wysoką zgodność modelu docelowego z wynikami eksperymentalnymi w zakresie odpowiedzi temperaturowej i nieco mniejszą zgodność w zakresie odpowiedzi przemieszczeniowej. Pozostawia to jednak otwartą drogę do dalszych badań. Do słabszych stron pracy należy zaliczyć pominięcie niektórych istotnych informacji technicznych (np. parametry czujników pomiarowych, parametry materiałowe przyjęte do modelowania, wymiary badanych próbek wełny).

3.2 Uwagi krytyczne

Uwaga ogólna

Niektóre rysunki zawarte w pracy nie mogą być przeanalizowane, ze względu na małą kontrastowość kolorów lub nieczytelność legendy, np. rys. 16, 68-71.

Rozdział 3

W opisie badań brakuje informacji o sposobie pomiaru temperatur w próbkach. Zwyczajowo podaje się nazwę czujnika i sprzętu rejestrującego wraz z nazwami producentów. Brakuje też informacji o częstotliwości próbkowania pomiarów oraz informacji zasadniczej, o wymiarach próbek. Nie ma też pewności co do odległości między punktami pomiarowymi w kierunku pionowym. Na rys. 14 zapisano, że odległości te są jednakowe pomiędzy sąsiednimi punktami, jednak to nie wynika z odległości podanych na pionowej linii wymiarowej po lewej stronie rysunku.

Podobnie, w rozdz. 3.6 przedstawiono jednowymiarowy model numeryczny przewodności cieplnej wełny mineralnej, ale nie podano wymiarów modelu, tzn. odległości między punktami i przekroju poprzecznego. Można się domyślać, że odpowiednio odpowiadają one odległościom eksperymentalnym, a przekrój poprzeczny jest jednostkowy, jednak powinno to być zapisane w pracy, by rozwiązać wątpliwości. Nie podano również definicji w modelu parametru dyfuzyjności – czy jest on podany jako funkcja, czy raczej jest zdefiniowany w sposób dyskretny, ale zmienny w czasie lub w dziedzinie temperatury.

W rozdz. 2.4.2 oraz 3.3 Autor zapowiada zastosowanie Metody III określania dyfuzyjności cieplnej, jednak nie podaje szczegółów tego podejścia. W rozdz. 2.4.2., na str. 46, gdzie przedstawiona jest Metoda III Autor pisze, że zastosowanie aproksymacji rozkładu temperatury w próbce minimalizuje piki temperatury spowodowane reakcjami chemicznymi w próbkach wełny mineralnej. Tymczasem Doktorant w pracy nie pokazuje wykresów temperatur względem zmiennej przestrzennej, a tylko względem czasu. Stąd, nie wiadomo jak te piki wyglądają i jak aproksymacja poprawia dane przestrzenne. Dobrze by było jakby w pracy zawarto wybrane wykresy temperatur względem zmiennej x .

Rozdział 4

Tytuł rozdziału nie informuje o jego treści – brakuje informacji o tym co jest w nim analizowane (płyty warstwowe).

Opis modelu numerycznego jest niejasny. Na przykład nie wiadomo, co Doktorant miał na myśli pisząc w rozdz. 4.4 (str. 75): „Each component of the model was designed with **linear geometry...**” lub “The facing was modelled as a 2D deformable shell extrusion with **homogeneous and nonlinear geometry**” lub “The core material (...) was modelled as a 3D solid extrusion, homogeneous, **with nonlinear geometry**”. Doktorant nie podaje w rozprawie wartości parametrów materiałowych. Podaje jedynie pozycje literaturowe, z których pobrano parametry modelowanej stali i wełny mineralnej.

Rozdział 5

Ponownie brakuje informacji o wszystkich wartościach parametrów materiałowych modelu.

• Pytania do Doktoranta

Uprzejmie proszę o podanie w trakcie obrony doktoratu odpowiedzi na następujące pytania.

1. Jak dokładnie stosuje się Metodę III określania dyfuzyjności materiału. Czy w każdej chwili czasowej dokonuje się aproksymacji danych przestrzennych i tak skorygowane próbki są użyte do wyznaczania drugiej pochodnej przestrzennej i pierwszej czasowej, potrzebnych do określenia dyfuzyjności?
2. Jak w modelu jednowymiarowym wełny mineralnej zadano parametr dyfuzyjności – czy w postaci dyskretniej, z wartościami w dziedzinie czasu, czy temperatury, czy może jako funkcję?
3. Proszę o wyjaśnienie, jak wnioski z rozdz. 5.4.1 wykorzystano w modelu docelowym ściany z paneli warstwowych lub w analizie wyników obliczeń w tym modelu?

3.3 Ocena formalnej strony rozprawy

• Poprawność cytowania źródeł

W rozdz. 2.4.1 można znaleźć obszerny fragment tekstu, skopiowany z publikacji cytowanej w rozprawie pod numerem [31]. Współautorem tej publikacji jest Doktorant. Jest to fragment, który rozpoczyna się w trzecim akapicie, od słów „The thermal conductivity of mineral wool...” (str. 38) i kończy z końcem pierwszego akapitu na str. 41. Trzeba zaznaczyć, że w pracach naukowych możliwe jest dosłowne przytaczanie wcześniej opublikowanych tekstów, jednak trzeba je opatrzyć cudzysłowem i podać oryginalne źródło. Podobnie, w podpisie rysunków 14, 15, 19, 21, 26, 28, 29, 95-97 powinno być podane źródło [31] bo są to rysunki pierwotnie podane w tej publikacji.

Dodatkowo, można znaleźć w pracy niepoprawne odniesienia literaturowe. Na przykład w miejscu cytowanych na stronie 39 prac [31,44] powinny stać numery [45, 46], a w miejscu numerów prac [42, 45, 46] powinny stać numery [36, 45, 46].

- **Poprawność odnośników**

Na stronie 27 jest odniesienie do rysunku 8, którego jednak w pracy brak.

- **Poprawność językowa**

Pracę napisano językiem zrozumiałym i według mnie w ogólności poprawnym. Zdarzyło się jednak kilka błędów gramatycznych. Pewne przykłady przytaczam poniżej:

- „the bushing connector used in this analysis” – pierwsze zdanie na stronie 112, brak orzeczenia;

- “They offer advantages as it leads to structures that are: lightweight, cost effectiveness and durability.” – ostatnie zdanie pierwszego akapitu, str. 19.

Znalazłam w pracy także kilka literówek, których nie wyszczególniam.

- **Precyzja opisów**

W pracy można znaleźć kilka nieścisłości, np.

- W tabeli 10 podano, że w testach 4 i 6 badana była próbka po teście 1, co jest niezgodne z opisem testów podanym w rozdz. 3;

- Ostatnie zdanie na str. 108 podaje: „In Tests 3’ and 4’, inward displacement was more pronounced due to more rigid suport conditions”, podczas gdy z opisu testów wywnioskowałam, że testy 1-3 mają te same warunki podparcia, a tylko model w teście 4 ma sztywniejsze podparcie na skutek zastosowania większej liczby wkretów;

- Na str. 141 napisano „The FEM model included the material parameter values from laboratory tests ...”, podczas gdy w rozdziale 5 napisano, że parametry te zostały wzięte z literatury;

- W pracy występują dosyć licznie powtórzenia stwierdzeń albo danych. Na przykład w tabeli 4 przy każdym teście dwa razy podano grubość wełny i jej ciężar objętościowy; ostatnie trzy akapity rozdziału 5.4.1 dotyczą tego samego wniosku o warunkach brzegowych.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Postawione w pracy hipotezy badawcze i powiązane z nimi cele należy uznać za ambitne i zaawansowane. Badania w skali naturalnej wykazały pewne fluktuacje wyników, co być może wskazuje na znaczenie lokalnych efektów i dowodzi potrzeby pogłębionych badań tego tematu. Docelowy model numeryczny, zbudowany w podejściu hierarchicznym, jest cennym, oryginalnym osiągnięciem, który może być punktem wyjścia do dalszych analiz. Kolejnym oryginalnym osiągnięciem Doktoranta jest nowa propozycja wyznaczania dyfuzyjności cieplnej materiału. Praca wnosi znaczący wkład w stan wiedzy na temat termomechanicznego zachowania paneli warstwowych z rdzeniem z wełny mineralnej w warunkach ogniowych. Jest to istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. **W związku z tym stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. El Mehdi Ablaoui spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018r., poz. 1668, z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie pracy do obrony.**

A. Tomaszewska