

Prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc,

Ostrava 06. 07. 2025

VSB - Technical University of Ostrava
Faculty of Mechanical Engineering,
Department of Mechanical Technology
Ostrava – Poruba
708 00

RECENZJA

pracy doktorskiej Pana mgr inż. Patryka Płaczka

***pt. "Badania własności użytkowych nowo zaprojektowanej ościeżnicy o
obniżonym współczynniku przenikalności termicznej"***

Promotor

Dr hab. inż. Tomasz Tański prof. PŚ

Promotor pomocniczy:

Dr inż. Przemysław Snopiński

Promotor z przemysłu:

mgr inż. Sławomir Kopiec

Gliwice, 2025

Podstawa formalna recenzji

Recenzja została opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej, pismo nr RDyMa/99/51/2025 z dnia 15.04.2025 r."

Ogólna charakterystyka pracy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Patryka Płaczka dotyczy aktualnych zagadnień efektywności energetycznej i podejścia proekologicznego w konstrukcjach budowlanych. Autor trafnie osadza swoje badania w szerszym kontekście wpływu urbanizacji na środowisko naturalne, podkreślając pilną potrzebę transformacji sektora budowlanego w Polsce w celu realizacji celów klimatycznych Unii Europejskiej.

Biurowo Dziekana

wpłynęło dnia 17.07.2025
RDyMa/1251/51/2025
nr zał.

Punktem wyjścia dla podjętej problematyki jest rozporządzenie Ministerstwa Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, które określa krytyczną wartość współczynnika przenikania ciepła dla przegród zewnętrznych lub między pomieszczeniami ogrzewanymi a nieogrzewanymi na poziomie $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Jak słusznie zauważa Doktorant, tak zdefiniowane wymagania w dużej mierze eliminują z rynku budowlanego tradycyjne konstrukcje stalowe ościeżnic, które są pozbawione przekładki termicznej. W odpowiedzi na to wyzwanie, Autor skupia się na opracowaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych, mających na celu zapewnienie wymaganej efektywności energetycznej ościeżnic. W tym celu analizuje zastosowanie materiałów izolacyjnych, takich jak pianki poliuretanowe czy polistyren, szczególną uwagę poświęcając poliuretanom ze względu na szerokie możliwości ich modyfikacji chemicznej.

Praca jest obszerna i kompletna, zawiera 110 stron maszynopisu, 22 tabele, 53 rysunki oraz 92 odwołania do literatury.

Ocena rozprawy oraz uwagi ogólne

W pierwszej części pracy Autor przedstawił koncepcję ościeżnicy wykorzystującej połączenie materiałów o niskim współczynniku przewodzenia ciepła z materiałami o wysokiej wytrzymałości, takimi jak stal czy aluminium. Prace badawcze wsparto modelowaniem numerycznym, opracowując model numeryczny ościeżnicy w środowisku CAD (SolidWorks), a następnie przeprowadzając analizę metodą elementów skończonych (MES) w programie Physibel w celu oceny przenikalności cieplnej.

Cel wdrożeniowy pracy został jasno sprecyzowany: opracowanie procesu produkcyjnego, który umożliwi wytworzenie pełnowartościowego, innowacyjnego produktu rynkowego. Autor zidentyfikował kluczowe kryteria funkcjonalne drzwi, od podstawowych (szerokość, wysokość, światło przejścia) po parametry fizyczne i mechaniczne, takie jak: przenikalność termiczna, odporność na obciążenie wiatrem, wodoszczelność, odporność na wielokrotne otwieranie i zamykanie, odporność na uderzenia, przepuszczalność powietrza, siły operacyjne, reakcja na ogień, właściwości akustyczne, wentylacja i kuloodporność. Słusznie podkreślono, że niski współczynnik przenikania ciepła jest parametrem priorytetowym dla drzwi zewnętrznych. Zwrócono również uwagę na wodoszczelność, której wielkość jest uzależniona od ciśnienia próbnego, oraz na odporność mechaniczną na cykliczne otwieranie i zamykanie jako cechy kluczowe dla użytkownika i trwałości produktu.

W dalszej części Doktorant szczegółowo analizuje funkcję samej ościeżnicy jako jednej z najważniejszych części składowych drzwi. W pracy przedstawiono przegląd najczęściej stosowanych materiałów, do których należą: poliuretany (oparte na skumulowanych wiąźnaniach – $\text{N}=\text{C}=\text{O}$), poliole (z dominującym udziałem polieterów – 90% i poliesterów – 10%), oraz szeroka gama stali, od powlekanych blach (DX51D+Z, DX52D+Z, aż do DX57D+Z) po stale konstrukcyjne (S235, S275, S355).

Doktorant zwrócił również uwagę na kluczowe dla wdrożenia aspekty, jakimi są

technologiczność konstrukcji oraz technologiczność procesu produkcyjnego drzwi. Problemy te analizuje dogłębnie, uwzględniając aspekty ekologiczne, obowiązujące normy prawne oraz dyrektywy unijne. Podkreśla przy tym konieczność doboru odpowiednich materiałów w celu minimalizacji kosztów produkcji przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości asortymentu. Wskazuje również, że osiągnięcie tych celów wymaga zastosowania automatyzacji, robotyzacji oraz zintegrowanych systemów informatycznych w ramach linii produkcyjnej.

Prace badawcze

Autor jako główny cel prac badawczych wskazał konstrukcję i produkcję nowego typu ościeżnicy stalowej. Charakteryzuje się ona podwyższonymi parametrami izolacyjnymi w stosunku do modeli aktualnie dostępnych w sprzedaży. Rozwiązanie to pozwoli na redukcję współczynnika przenikalności termicznej drzwi przy jednoczesnym zachowaniu dotychczasowej grubości skrzydła. W efekcie umożliwi to stworzenie normatywnego i konkurencyjnego cenowo produktu.

Przedmiotem eksperymentu były powszechnie stosowane materiały inżynierskie, takie jak poliuretan, stale i stopy aluminium. W ramach prac, realizowanych w latach 2020–2024, autor przeprowadził badania podstawowe, eksperymentalne, branżowe oraz wdrożeniowe. Realizacja planu badawczego objęła analizy numeryczne przenikalności cieplnej oraz badania eksperymentalne właściwości mechanicznych, w tym wytrzymałości na rozciąganie i odporności na ścinanie. Dodatkowo, przeprowadzono analizę w celu oceny przydatności materiału zastosowanego na przekładkę termiczną.

W pierwszym etapie analizowano profil poliuretanowy o gęstości 600 kg/m^3 , który charakteryzował się niską sztywnością. W celu jego wzmocnienia zastosowano profil z drewna klejonego, co jednak prowadziło do powstawania niepożądanych wiórów podczas cięcia. W kolejnym kroku, dla wzmocnienia zewnętrznych powierzchni ościeżnicy, użyto stalowych okładzin pokrytych folią PCV. Otwory w blachach wykrawano na urządzeniu Trumpf 1000, a następnie zaginano je na krawędziarkach VIMERCATI. W dalszej kolejności montowano uchwyty zawiasowe i elementy ryglowe. Na końcu, rowki w profilu wypełniono poliuretanem o gęstości 1200 kg/m^3 , a cały profil – poliuretanem o niskiej gęstości (33 kg/m^3).

W dalszej części pracy autor podaje rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe ościeżnicy (tabela 6). Autor zidentyfikował podstawowy problem konstrukcyjny, niezależny od kwestii przenikalności termicznej. Było nim zapewnienie odpowiedniej adhezji między blachą a rdzeniem poliuretanowym.

W dalszej części pracy autor analizował 3 koncepcje połączeń kształtowników stalowych lub aluminiowych z różnymi kształtami profili połączonych poliuretanem w celu dokładnego pomiaru analizy przenikalności termicznej. Testy przenikalności cieplnej były przeprowadzone dla trzech gęstości poliuretanu, łączącego kształtowniki oraz dwóch rodzajów materiałów kształtowników: stali DX51D, oraz stopu aluminium 6061. Następnie przeprowadzono próby wytrzymałości na rozciąganie w celu porównania własności mechanicznych zaproponowanych koncepcji w miejscu połączenia blachy z poliuretanem.

Technologia produkcji prototypu ościeżnicy jest podana przejrzysto. Tabela współczynników przenikalności termicznej materiałów użytych do badań jest zrozumiała. Dla wyżej wymienionych 3 koncepcji połączeń autor analizuje współczynnik przenikalności cieplnej przy użyciu oprogramowania BISCO.

Główny cel pracy a następnie podcele pracy powinny być ujęte punktowo ze względu metodyki osiągnięcia potrzebnych wyników badań.

Zauważono również istotną nieścisłość w kolejności prezentacji treści. Z metodycznego punktu widzenia analiza właściwości mechanicznych, uzyskana z prób wytrzymałości na rozciąganie, powinna poprzedzać opis technologii produkcji prototypu ościeżnicy, ponieważ to właśnie te wyniki stanowią podstawę do przyjęcia określonych rozwiązań technologicznych.

Próby wytrzymałości na rozciąganie autor wykonał na urządzeniu wytrzymałościowym ZWICK Z100. Brakuje jednak informacji o liczbie przeprowadzonych prób dla każdej analizowanej koncepcji. Jest to kluczowe dla statystycznej weryfikacji i wiarygodności uzyskanych wyników.

Przedstawione wyniki ograniczają się do ogólnego komentarza na temat przebiegów sił. Brakuje ich dokładnej, ilościowej analizy.

W opracowaniu pominięto ponadto analizę kluczowych parametrów mechanicznych, takich jak umowna granica plastyczności ($R_{p0,2}$), wytrzymałość na rozciąganie (R_m) oraz plastyczność, wyrażona przez wydłużenie (A).

W części poświęconej analizie przewodnictwa cieplnego autor słusznie podkreśla, że kluczowe znaczenie ma koncepcja ułożenia przekładki termicznej w profilu. Zostało to trafnie wskazane jako czynnik ważniejszy niż szczegółowe warianty materiałowe, rodzaje połączeń czy kierunek otwierania skrzydła drzwiowego.

Ważnym osiągnięciem przeprowadzonych badań jest obniżenie współczynnika przenikalności cieplnej ościeżnicy aż o 50%, co uzyskano dzięki zastosowaniu poliuretanowej przekładki termicznej.

Autor przeprowadził następnie następujące badania:

- przenikalności termicznej zaprojektowanego profilu,
- wytrzymałości na rozciąganie przekroju poprzecznego profilu ościeżnicy,
- wodoszczelności i odporności na obciążenie wiatrem,
- odporności drzwi na wielokrotne otwieranie i zamykanie.

Należy zaznaczyć, że badania dotyczące wodoszczelności i odporności na obciążenie wiatrem zostały opisane bez szczegółowej analizy wyników. Podobnie, testy odporności na wielokrotne otwieranie i zamykanie drzwi również zostały jedynie opisane.

Wyniki badań

ad a) Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem gęstości poliuretanu we wszystkich analizowanych wariantach rośnie wartość współczynnika przenikalności termicznej ramy (U_f). Jest to zjawisko niekorzystne, które wynika bezpośrednio z wyższego współczynnika przewodzenia ciepła (λ) charakteryzującego poliuretany o większej gęstości. Mimo to, autor dochodzi do wniosku, że różnice

w uzyskanych wynikach nie są na tyle istotne, aby na obecnym etapie badań wykluczyć którykolwiek z zastosowanych typów poliuretanu z dalszej analizy. Na podstawie przeprowadzonej analizy numerycznej autor sformułował kluczowy wniosek. Wykazał, że wdrożenie innowacyjnej koncepcji, która polega na eliminacji mostka termicznego poprzez zastosowanie poliuretanowej przekładki termicznej, przyniosło wymierny efekt. Dzięki temu rozwiązaniu współczynnik przenikalności cieplnej badanej ościeżnicy został obniżony o 50% w porównaniu do wartości tego samego współczynnika dla tradycyjnej ościeżnicy stalowej. Uzyskany rezultat został oceniony przez autora jako bardzo pozytywny i potwierdzający słuszność przyjętych założeń projektowych.

ad b) Celem autora było określenie wpływu zmiany gęstości poliuretanowej przekładki termicznej, zastosowanej w ościeżnicy, na wytrzymałość połączenia elementów blaszanych. W tej części badań jest analizowany wpływ zastosowania przekładki na wytrzymałość na rozciąganie przekroju poprzecznego profilu ościeżnicy w zależności od gęstości zastosowanego poliuretanu.

W przypadku próbek z poliuretanem o gęstości 33 kg/m^3 (typ A30S) nie udało się wyznaczyć granicy plastyczności. Z tego powodu ocenę ich właściwości mechanicznych oparto wyłącznie na sile zrywającej. W tekście brakuje jednak uzasadnienia, dlaczego autor odstąpił od klasycznej metodyki przeprowadzania prób na rozciąganie, która standardowo obejmuje analizę pełnego wykresu naprężenie-odkształcenie. Próbki te charakteryzowały się niską wytrzymałością połączenia. Siła zrywająca, osiągająca wartość zaledwie 80 N, została błędnie opisana jako "wytrzymałość", podczas gdy jest to wartość siły, a nie naprężenia (wyrażonego np. w MPa).

Dla próbek z poliuretanem o wyższych gęstościach zaobserwowano wyraźną granicę plastyczności, po przekroczeniu której następowało zerwanie połączenia. Jest to wynik pozytywny i zgodny z oczekiwaniami. Siły niezbędne do uszkodzenia tych próbek były znacznie wyższe i wynosiły odpowiednio 158 N oraz 932 N. Potwierdza to, że zwiększenie gęstości poliuretanu ma kluczowy, pozytywny wpływ na wytrzymałość mechaniczną analizowanego połączenia.

Na podstawie analizy wyników badań do dalszych prac badawczych autor wybrał jeden przekrój (A) oraz dwie gęstości poliuretanu: $600 \text{ i } 1200 \text{ kg/m}^3$, które wykazały lepszą wytrzymałość w porównaniu do wytrzymałości poliuretanu o gęstości 33 kg/m^3 oraz drewna sosnowego. Autor stwierdza, że próbki mające zwartą strukturę komórkową z wyższymi wielkościami wytrzymałości od drewna, mogą zapewnić osiągnięcie pożądanych rezultatów w dalszych testach oraz optymalizacji konstrukcji.

Na podstawie uzyskanych wyników prac badawczych autor odrzucił koncepcję ościeżnicy wykonanej z aluminium (Al). Głównym powodem tej decyzji był wysoki współczynnik przewodzenia ciepła tego materiału. W kolejnych etapach badań skupiono się wyłącznie na koncepcji ościeżnicy stalowej (typ A1200S), która wykorzystuje wkładkę z poliuretanu o gęstości 1200 kg/m^3 .

ad c) Badania wodoszczelności i obciążenia na wiatr są opisane bez analizy szczególnej wyników.

ad d) Analiza odporności na wielokrotne otwieranie i zamykanie również została potraktowana

zbyt ogólnikowo.

W końcowej fazie pracy skupiono się na szczegółowej analizie ościeżnicy wykonanej z kształtowników stalowych. Proces produkcyjny obejmował wykrawanie i gięcie poszczególnych elementów, które następnie łączono i wypełniano poliuretanem, tworząc w ten sposób monolityczny profil.

Takie podejście przyniosło kilka kluczowych korzyści:

- Zmniejszono ilość odpadów produkcyjnych.
- Zachowano optymalną sztywność konstrukcji.
- Uzyskano znaczącą poprawę izolacyjności termicznej.

W rezultacie autorowi udało się zarówno usprawnić efektywność procesu produkcyjnego, jak i podnieść jakość końcowego produktu.

Wybrane, koncepcje ościeżnicy zostały poddane analizie numerycznej w celu określenia współczynników przenikalności cieplnej. Do tych obliczeń wykorzystano specjalistyczne oprogramowanie BISCO. Na zakończenie pracy przedstawiono również propozycję metodyki wdrożenia zaprojektowanej konstrukcji do produkcji seryjnej.

Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

- na wstępie pracy powinna być podana tabela z wykazem wszystkich użytych symboli oraz jednostek fizycznych i materiałowych.
- w pracy dochodzi do drobnych pomyłek w jednostkach - Przykładowo, wytrzymałość na rozciąganie (R_m) powinna być wyrażona w megapaskalach (MPa), a nie w niutonach (N), które są jednostką siły.
- zauważono niezgodność w kolejności prezentowanych badań w stosunku do pierwotnie założonego planu. Po analizie wytrzymałości na rozciąganie powinny nastąpić, zgodnie z logiką badawczą, testy wodoszczelności i odporności na obciążenie wiatrem, a dopiero później badania zmęczeniowe.
- analiza danych z prób rozciągania jest niepełna. Brakuje szczegółowej interpretacji uzyskanych wykresów siła-przemieszczenie, a wyniki zostały jedynie ogólnie skomentowane.
- brakuje analizy kluczowych właściwości mechanicznych, takich jak granica plastyczności ($R_{p0,2}$), wytrzymałość na rozciąganie (R_m) i plastyczność (A).
- W pracy brakuje wykazu własnych publikacji autora. Przedłożenie go w trakcie obrony jest warunkiem koniecznym do spełnienia wymogów formalnych związanych z nadaniem stopnia doktora Panu mgr. inż. Patrykowi Płaczkowi.

W ogólnej ocenie stwierdzam, że główne cele badawcze oraz cele cząstkowe pracy zostały osiągnięte.

Przeprowadzone badania i ich wyniki potwierdziły, że opracowana ościeżnica stalowa z wkładką poliuretanową ma potencjał do wdrożenia w produkcji przemysłowej. Autor udowodnił, że końcowa,

zoptymalizowana konstrukcja spełnia wszystkie kluczowe kryteria normatywne, w tym wymagania dotyczące:

- przenikalności cieplnej,
- wytrzymałości mechanicznej przekroju,
- wodoszczelności i odporności na obciążenie wiatrem,
- trwałości w testach wielokrotnego otwierania i zamykania.

Ocena końcowa pracy:

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych oraz badań eksperymentalnych autor sformułował następujące wnioski:

1. Z osiągniętych wyników można wnioskować, że jest realne wyprodukowanie nowego typu ościeżnicy stalowej o podwyższonych parametrach izolacyjnych, która umożliwi redukcję parametrów przenikalności termicznej drzwi przy jednoczesnym zachowaniu dotychczasowej grubości skrzydła drzwiowego, co w efekcie umożliwi stworzenie normatywnego i przystępnego cenowo produktu.

2. Zastosowanie poliuretanu jako materiału izolacyjnego jest jak najbardziej rekomendowane. Kluczowe jest jednak, aby był to poliuretan o podwyższonej gęstości. Jest to warunek niezbędny do osiągnięcia wymaganej sztywności całej konstrukcji ościeżnicy, co stanowi jeden z najważniejszych postulatów wynikających z pracy.

3. Porównanie profili ościeżnicy, w których jako wzmocnienie zastosowano kształtowniki ze stali oraz stopu aluminium, wykazało, że mimo szerokiego zastosowania w budownictwie, stopy aluminium nie spełniają wymagań funkcjonalnych z powodu wysokiej rozszerzalności cieplnej Al.

4. Następnym czynnikiem badań było zminimalizowanie mostków termicznych w miejscu styku ościeżnicy ze skrzydłem drzwiowym. Autor udowodnił, że radiacyjne przenikanie ciepła do wnętrza profili prowadzi do zwiększenia współczynnika przenikalności cieplnej przekroju o ok. $1 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, zwłaszcza w przypadku zastosowania materiałów o wysokiej przewodności cieplnej. Wykorzystanie wypełnienia poliuretanowego oraz odpowiednie zaprojektowanych kształtowników stalowych pozwoliło na znaczne ograniczenie danego wpływu.

5. Analiza procesu produkcyjnego na etapie projektowania profilu ościeżnicy umożliwiła jego optymalizację pod kątem produkcji seryjnej. Autor dokładnie zanalizował zintegrowanie cyklu gięcia kształtowników z jednoczesnym wypełnianiem ich poliuretanem, co usprawnia proces produkcyjny. Rozwiązanie jest w zgodzie z założeniami Lean Manufacturing, przyczyniając się do skrócenia czasu produkcji.

6. Autor porównał wyniki badań na nowej (prototypowej) ościeżnicy z istniejącymi rodzajami ościeżnic i udowodnił, że nowa konstrukcja ościeżnicy, z zastosowaniem poliuretanu jako przekładki termicznej i stali, spełnia normy przenikalności termicznej ($1,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), wyznaczone w rozporządzeniach Ministerstwa Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej. Wodoszczelność i odporności na obciążenie wiatrem drzwi spełniła dane podane w normie technicznej.

