

prof. dr hab. inż. Maria Kotelko
Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji
Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka
ul. B. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź
maria.kotelko@p.lodz.pl

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I TRANSPORTU

Data 19-12-2025
Wpł.

Podpis

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Joanny Kustos**

**pt.: "Trójwarstwowy zbiornik ciśnieniowy o prostokątnym przekroju
poprzecznym do zastosowania w pneumatycznym systemie zawieszenia
pojazdów szynowych"**

Podstawę do opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej, Pana prof. dr hab. inż. Jacka Pielecha z dnia 8.10.2025 r.

1. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest opracowanie koncepcji prostopadłościennego zbiornika ciśnieniowego zbudowanego z trójwarstwowych płyt z rdzeniem pianowym, który mógłby być zastosowany w pneumatycznym układzie zawieszenia drugiego stopnia pojazdów szynowych jako zbiornik wyrównawczy. Prace nad rozwiązaniem konstrukcyjnym takiego zbiornika rozpoczęto w ramach projektu badawczo-rozwojowego, którego tematem było opracowanie hybrydowego zespołu trakcyjnego. Doktorantka brała udział w tym projekcie, stąd jej zainteresowanie tym zagadnieniem. Ze względu na dużą liczbę elementów konstrukcyjnych, które muszą być umieszczone w podwoziu i nadwoziu takiego pojazdu, powstał problem ograniczenia przestrzeni do zabudowy zbiorników wyrównawczych, stanowiących istotny element układu zawieszenia. Tak powstała koncepcja zastąpienia zbiornika cylindrycznego zbiornikiem prostopadłościennym. Tematyka pracy ma charakter interdyscyplinarny, obejmuje bowiem zagadnienia z obszaru dyscypliny inżynieria mechaniczna oraz dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport. Tematyka ta wpisuje się w najnowsze trendy rozwoju obu dyscyplin.

2. Treść rozprawy

Praca składa się z 6-ciu rozdziałów, spisu literatury (bibliografii) cytowanej w tekście, zawierającej 61 pozycji, streszczeń w języku polskim i angielskim oraz załącznika zawierającego wykaz zrealizowanych obliczeń numerycznych. Ogółem praca zawiera 104 strony.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do rozprawy, w którym omówiono ogólnie zagadnienie będące jej przedmiotem, tj. hybrydowych zespołów trakcyjnych, systemów zawieszenia pneumatycznego pojazdów szynowych oraz zbiorników wyrównawczych, stosowanych w tych systemach.

Rozdział drugi zawiera cel, tezę i zakres pracy. Doktorantka stawia tezę, iż „*możliwe jest zastąpienie klasycznych cylindrycznych zbiorników wyrównawczych wykonywanych z materiałów jednorodnych sandwiczowym zbiornikiem ciśnieniowym o prostokątnym przekroju poprzecznym*”. Formułując tę tezę, Autorka zastrzega, że w pracy nie badano technologicznych możliwości wykonania takiego zbiornika. Nie zbadano także, czy obowiązujące akty normatywne pozwalają na ewentualne dopuszczenie takiego zbiornika do eksploatacji.

W rozdziale trzecim przedstawiono przegląd literatury przedmiotu. Autorka podzieliła go na trzy podrozdziały, w których omówiła kolejno publikacje nt zbiorników ciśnieniowych wykonanych z materiałów kompozytowych, zbiorników o prostokątnym przekroju poprzecznym, a także prac poświęconych ogólnie struktutom sandwiczowym (w tym modelowaniu analitycznemu i numerycznemu tych struktur).

W rozdziale czwartym opisano szczegółowo przedmiot badań, jego zakres, a także numeryczny model obliczeniowy, oparty na metodzie elementów skończonych (MES). Zbudowano dwa modele obliczeniowe: wyizolowanej trójwarstwowej płyty sandwiczowej z rdzeniem pianowym oraz model zbiornika prostopadłościennego zbudowanego z takich płyt. Modele utworzono i obliczeń dokonywano w komercyjnym kodzie obliczeniowym ABAQUS. Wyizolowaną płytę sandwiczową, utwierdzoną na obwodzie i obciążoną ciśnieniem 1 MPa, zamodelowano dla celów porównawczych za pomocą dwu typów elementów skończonych, tj. elementów powłokowych oraz elementów bryłowych. Wyniki obliczeń, podane w rozdziale następnym wykazały bardzo małą różnicę (ok. 1%) w ugięciach maksymalnych płyty dla obu przypadków. Zbiornik ciśnieniowy zbudowany z trójwarstwowych płyt sandwiczowych z rdzeniem pianowym zamodelowano za pomocą elementów bryłowych (zarówno płyty płaszcza, jak i dennice). Aby połączyć czołowo płyty płaszcza z dennicą, zastosowano pośrednie elementy struktury (okładzina i warstwa rdzenia), zamodelowane również elementami skończonymi typu bryłowego. Uwagi krytyczne dotyczące zamodelowania tego połączenia zawarte są w dalszej części recenzji. Zarówno materiał okładzin (aluminium), jak i rdzenia (piana aluminiowa) zamodelowano jako materiały liniowe, izotropowe. Podano parametry materiałowe, jakkolwiek nie jest jasne, czy zaczerpnięte są one z literatury, od wytwórców, czy też wykonano własne próby wytrzymałościowe. Wykorzystano symetrię i zamodelowano 1/8 zbiornika, ze względu na czas obliczeń. Przeprowadzono klasyczną liniową analizę statyczną, stosowaną powszechnie w obliczeniach inżynierskich. W rozdziale czwartym opisano także szczegółowo plan obliczeń MES, przeprowadzonych przy wykorzystaniu opisanego wyżej modelu obliczeniowego. Przeprowadzono 6 (wg terminologii Autorki) „rodzajów” badań, w których analizowano wpływ

- zmienności gabarytów (wymiarów zewnętrznych),
 - grubości okładzin,
 - grubości rdzenia,
 - stosunku grubości rdzenia do okładzin,
 - modułu Younga rdzenia,
 - liczby przegród wzmacniających,
- na stan naprężeń i ugięć ścian zbiornika.

Rozdział piąty zawiera szczegółowe wyniki obliczeń numerycznych. Po zaprezentowaniu wyników obliczeń porównawczych dla płyt, wspomnianych już wyżej, opisano bardzo obszernie wyniki obliczeń ugięć ścian zbiornika oraz stanu naprężeń zredukowanych dla rozpatrzonych wariantów obliczeniowych. Wyniki te przedstawiono w formie tablic, wykresów słupkowych oraz map ugięć i naprężeń zredukowanych, obliczonych wg hipotezy Hubera-Misesa. Wobec wielkiej liczby różnych zmiennych parametrów, przyjęto następującą metodologię opracowania wyników. Rozpatrując poszczególne „rodzaje” (warianty) o różnych zmiennych parametrach eliminowano z danego zbioru te, które nie spełniały warunku

wytrzymałościowego. Warunek ten przyjęto na podstawie danych literaturowych, biorąc pod uwagę granice plastyczności wybranych stopów aluminium. Metodologia ta budzi pewne wątpliwości przedstawione w dalszej części recenzji.

W rozdziale 6-tym, na podstawie otrzymanych wyników symulacji numerycznych MES, sformułowano wnioski, dotyczące wpływu parametrów wspomnianych wyżej na maksymalne wartości ugięć ścian zbiornika oraz maksymalne wartości naprężeń zredukowanych w zbiorniku. Określono również zbiór 36-ciu konfiguracji zbiorników, które spełniły zdefiniowane przez Autorkę kryterium wytrzymałościowe, przy jednoczesnej maksymalizacji pojemności zbiornika. W tymże rozdziale odniesiono się do możliwości technologicznych wykonania zbiornika, będącego przedmiotem badań. Ograniczono się do próby spawania dwu ścian o strukturze sandwiczowej za pomocą spoiny pachwinowej. Nie przedstawiono wyników badań wykonanego połączenia, tj. pomiarów imperfekcji, oględzin stanu okładzin i rdzenia, badań ultradźwiękowych czy prób wytrzymałościowych. W podsumowaniu Autorka stwierdza, że teza pracy została potwierdzona, tj. możliwe jest zastąpienie klasycznego zbiornika wyrównawczego zbiornikiem prostopadłościennym o ścianach zbudowanych z płyt sandwiczowych. Kandydatka przedstawia również perspektywy dalszych badań, m.in. opracowanie projektu zbiornika, opracowanie technologii jego wykonania, badania doświadczalne połączeń spawanych, badanie szczelności wykonanego zbiornika, badania doświadczalne wykonanego zbiornika w warunkach eksploatacyjnych.

2. Ogólna ocena rozprawy

Doktorantka podjęła się rozwiązania inżynierskiego zagadnienia (analizy wytrzymałościowej) nowatorskiego rozwiązania konstrukcyjnego zbiornika ciśnieniowego zbudowanego z płyt trójwarstwowych z rdzeniem pianowym. Zbiornik prostopadłościenny o takiej konstrukcji nie był dotąd przedmiotem analizy, zatem propozycja nowatorskiej koncepcji zbiornika ciśnieniowego, sformułowanie tego zagadnienia oraz dokonana analiza wytrzymałościowa stanowi istotny przyczynek do rozwoju wiedzy w obszarze analizy wytrzymałościowej zbiorników ciśnieniowych. Celem Kandydatki było udowodnienie, iż możliwe jest zbudowanie takiego zbiornika, który spełniałby warunek wytrzymałościowy. Cel ten osiągnęła, przeprowadzając eksperyment numeryczny, tj. bardzo szczegółową analizę parametryczną za pomocą symulacji numerycznych MES. Pewne wątpliwości, opisane w dalszej części recenzji, budzi sformułowanie tego celu. Na podstawie wyników symulacji MES Autorka sformułowala wnioski, dotyczące doboru szeregu parametrów konstrukcyjnych, wymienionych wyżej. Zakres pracy obejmuje opracowanie modelu numerycznego w środowisku kodu ABAQUS i przeprowadzenie obliczeń, przy wykorzystaniu tego modelu. Model ten został zbudowany prawidłowo, przy pewnych zastrzeżeniach, podanych niżej. Na podkreślenie zasługuje przeprowadzenie analizy porównawczej wyników symulacji dla płyt, przy zastosowaniu dwu typów elementów skończonych, tj. powłokowych i bryłowych. Kandydatka wykazała się zatem szeroką wiedzą z zakresu metod numerycznych mechaniki, w szczególności metody elementów skończonych oraz umiejętnością zaplanowania eksperymentu numerycznego.

Układ pracy jest przejrzysty, jej redakcja jest dość staranna, aczkolwiek budzi pewne zastrzeżenia, wymienione w następnym paragrafie. Bibliografia opracowana jest adekwatnie do tematu pracy, posiada jednakże pewne mankamenty, podane niżej. Biorąc powyższe pod uwagę, moja ogólna merytoryczna ocena rozprawy jest pozytywna., mimo pewnych uwag krytycznych, przedstawionych niżej.

3. Uwagi krytyczne

- 3.1. Podstawowym założeniem pracy jest, iż prostopadłościenny wyrównawczy zbiornik ciśnieniowy jest optymalny ze względu na wykorzystanie ograniczonej przestrzeni do zabudowy w pneumatycznym układzie zawieszenia pojazdu szynowego. Ponadto założono, że zbiornik taki byłby wykonany z trójwarstwowych płyt sandwiczowych z rdzeniem pianowym. Jako jedyne kryterium do udowodnienia prawidłowości tego założenia przyjęto kryterium wytrzymałościowe w powiązaniu z kryterium objętościowym, w oderwaniu od możliwości technologicznych wykonania takiego zbiornika, spełnienia warunków szczelności i przepisów normatywnych. Prostopadłe zbiorniki ciśnieniowe mają obecnie szerokie zastosowanie, jako elementy powietrznych wymienników ciepła, instalacji rurowych, a także w usługach szpitalnych i pralniach. Są również stosowane do magazynowania próbek z odpadów radioaktywnych. Główną zaletą zbiorników ciśnieniowych o przekroju innym niż cylindryczny jest większa wydajność objętościowa. Zapewniają one zatem większą pojemność przy ograniczonej przestrzeni, jest to więc rozwiązanie korzystne w przypadku rozpatrywanego zbiornika wyrównawczego. Jednakże proces ich wytwarzania jest technologicznie skomplikowany, ze względu na formowanie dużych płaskich płyt oraz trójwymiarowych stref przejściowych w narożnikach, a także łączenia płyt w narożach za pomocą spawania. Proces ten szczególnie się komplikuje przy łączeniu płyt trójwarstwowych z rdzeniem pianowym. Koncentracja naprężeń w obszarze łączenia (spawu) zwiększa ryzyko wad spawalniczych i odkształceń. Ma to negatywny wpływ na szczelność oraz nośność ciśnieniową zbiornika.
- 3.2. Jak już wspomniano wyżej, w pracy nie przedstawiono wyników badań eksperymentalnych wykonanego połączenia spawanego dwu płyt sandwiczowych (Rys. 65). Nie wykonano także badań eksperymentalnych zbiornika. Autorka wymienia wprawdzie badania doświadczalne w sugerowanym planie przyszłych badań, jednakże wstępne badania można by przeprowadzić na uproszczonym modelu zbiornika, np. na prostopadłościennie zespawanym z płyt sandwiczowych, obciążonym ciśnieniem za pomocą pompy wodnej. Przeprowadzenie takich badań, nawet w ograniczonym, jak wyżej, zakresie, umożliwiłoby walidację wyników MES. Jak już wspomniano, parametry mechaniczne, zarówno okładzin, jak i rdzenia przyjęto prawdopodobnie na podstawie danych literaturowych. Nie przeprowadzono własnych badań wytrzymałościowych próbek płyty sandwiczowej, aby otrzymać bardziej adekwatne wartości parametrów mechanicznych przyjętych w modelu MES.
- 3.3. Przyjęte kryterium doboru, czy też eliminacji zbiorników z określonego zbioru budzi pewne wątpliwości. Za kryterium to przyjęto granicę plastyczności litego stopu aluminium przy maksymalnej objętości. Nie brano pod uwagę wytrzymałości piany aluminiowej (szczególnie na ścinanie), która może być różna od litego materiału, ponadto różni się w zależności od gęstości piany. Gęstość ta jest (jak Autorka przyznaje) zmienna wzdłuż grubości rdzenia. Również moduł Younga piany jest funkcją jej gęstości. Zjawiska tego nie uwzględniono w modelu obliczeniowym rdzenia.
- 3.4. Maksymalne naprężenia zredukowane stwierdzono (zgodnie z przewidywaniami) w obszarze połączenia płyt płaszcza oraz płyt płaszcza z dennicami. W tych obszarach należy się spodziewać inicjacji ewentualnego mechanizmu zniszczenia. Zastosowany model obliczeniowy (generalnie poprawny) nie pozwala na analizę efektów lokalnych w tych obszarach. Taka pogłębiona analiza (kluczowa ze

względem na szacowanie nośności) byłaby możliwa poprzez zamodelowanie spoin, jako osobnych obszarów (pasm) trójwymiarowych, przy założeniu kontaktu z trójwymiarowymi sąsiadującymi obszarami przejściowymi. Modele takie można znaleźć w wielu publikacjach dotyczących modelowania spoin.

- 3.5. Przedstawione w rozprawie mapy ugięć i naprężeń zredukowanych (począwszy od rys. 3.3 (błędnie oznaczonego jako 3333) i dalszych obrazują stan deformacji i naprężeń zredukowanych globalnie. Nie pokazano powiększonych map we wspomnianych wyżej obszarach kontaktowych zarówno od wewnątrz, jak i od zewnątrz zbiornika. Nie przeprowadzono również pogłębionej analizy stanu składowych stanu naprężenia. Nie przedstawiono w szczególności rozkładu naprężeń zarówno normalnych, jak i stycznych wzdłuż grubości zbiornika (w trzech warstwach) oraz w funkcji odległości od linii kontaktu ścian zbiornika, czy też w odległości od połączenia ścian z dennicami. Pozwoliłoby to na oszacowanie efektu zgięciowego. Nie stwierdzono, które składowe stanu naprężenia są dominujące i jaki jest udział poszczególnych składowych stanu naprężenia w rdzeniu. Jest to szczególnie istotne w obszarach koncentracji naprężeń i dla płyt o dużym stosunku grubości rdzenia do okładzin. Przy maksymalnym stosunku grubości rdzenia do grubości okładzin ($h/h_f = 20$) w obszarach połączeń mogą wystąpić efekty fałdowania okładzin (ang. *wrinkling*), wgniecenia rdzenia, czy nawet delaminacji. Efekty te, jeżeli wystąpią, mają kluczowe znaczenie dla scenariusza ewentualnego zniszczenia. Uwagi zawarte w tym podpunkcie oraz powyższym (3.4.) są szczególnie istotne wobec braku wyników badań eksperymentalnych.
- 3.6. Jak już wspomniano przegląd literatury jest adekwatny do obszaru badań przedstawionych w pracy. Jednakże w części, w której Autorka przedstawia historyczny przegląd najstarszych prac, dotyczących struktur sandwichowych, jest on niekompletny. Nie zacytowano najstarszych monografii Plantemy (1966), Stamma i Witte'go (1974), a szczególnie pionierskiej polskiej monografii Teisseyere i in. (1972). Błędnie zacytowano datę i temat pracy [14]. Praca ta nie dotyczy samolotu bojowego Mosquito (co nawet wynika z jej tytułu). Istotnie konstrukcję tego samolotu bojowego z II Wojny Światowej wymienia się w wielu źródłach, jako jedno z pierwszych zastosowań konstrukcji sandwichowych. Zastosowano tam drewno balsa (zarówno dla okładziny, jak i rdzenia). Autorka nie cytuje i nie omawia żadnych aktów normatywnych, w których zawarte są zalecenia m.in. dotyczące warunków wytrzymałościowych stawianych zbiornikom ciśnieniowym i dopuszczalności stosowania zbiorników o przekroju innym niż cylindryczny. Zacytowanie i omówienie takich norm pozwoliłoby na sformułowanie wniosków w aspekcie zastosowań inżynierskich proponowanego rozwiązania konstrukcyjnego.
- 3.7. W planach (perspektywach) dalszych badań rekomenduję przeprowadzenie procedury optymalizacyjnej doboru parametrów zbiornika przy zastosowaniu jednej z metod optymalizacji wielokryterialnej.

4. Uwagi edytorskie

Jak wspomniano wyżej, redakcja pracy jest dość staranna. Jednakże praca zawiera pewne błędy edytorskie. Występują błędy w numeracji i podpisach pod niektórymi rysunkami, wynikające z błędnego kopiowania, np.: „Rysunek 3636”, „Rys. 5654”, i inne. Również w kilku miejscach w tekście, odwołującym się do rysunków występują podobne błędy.

Mapy naprężeń zredukowanych są mało czytelne. Wiąże się to z uwagą 3.5.

Na rys. 36 (błędnie oznaczonym jak 3636) wartość naprężenia zredukowanego dla wariantu 1x4x1 wynosi powyżej 245 MPa, podczas gdy w tabeli wartość ta wynosi 234,4

MPa. Na rys. 17 oraz w tabeli 1. i dalszych, wysokość zbiornika oznaczona jest jako „c”, podczas gdy w tekście (str. 30) wymieniona jest, jako „ $h = 200\text{ mm}$ ”. Ogólnie, przejrzystość całego tekstu była by lepsza, gdyby umieszczono na wstępie wykaz ważniejszych oznaczeń. Styl cytowań jest niejednolity. Autorka nie stosuje konsekwentnie jednego stylu (np. MLA8*). W niektórych pozycjach dane bibliograficzne są niekompletne.

Wniosek końcowy

Dorobek publikacyjny Doktorantki obejmuje 3 artykuły opublikowane w czasopismach z listy JCR (według bazy Scopus), oraz 2 publikacje w czasopismach nie rejestrowanych w bazie Scopus, co wypełnia wymogi ustawowe. Kandydatka jest współautorką tych publikacji. Ich tematyka jest powiązana z tematyką rozprawy, dotyczy bowiem belek sandwichowych.

Biorąc pod uwagę:

1. Merytoryczną, pozytywną ocenę rozprawy, przedstawioną powyżej, na podstawie której wnioskuję, iż rozprawa spełnia w stopniu wystarczającym wymogi ustawowe, w szczególności wymóg *oryginalnego rozwiązania problemu naukowego*,
2. oraz dotychczasowy dorobek publikacyjny Doktorantki spełniający całkowicie wymagania ustawowe,

stwierdzam, że ogólnie dorobek publikacyjny i rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Kustos .pt: „*Trójwarstwowy zbiornik ciśnieniowy o prostokątnym przekroju poprzecznym do zastosowania w pneumatycznym systemie zawieszenia pojazdów szynowych*” spełnia w stopniu wystarczającym warunki stawiane przez ustawę „*Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce*” z dn. 20.07. 2018 r. (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571) wraz z późniejszymi zmianami i może być podstawą do nadania stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Wnioskuję zatem o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Łódź, 18. grudnia 2025 r

