

dr hab. inż. Lucjan Ślęczka, prof. PRz

Rzeszów, 16 sierpnia 2018 r.

Politechnika Rzeszowska

Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

ul. Poznańska 2

35-084 Rzeszów

sleczka@prz.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Gryniwicza pt.

„Metoda modelowania konstrukcji hal stalowych obudowanych blachą trapezową”

1. Podstawa opracowania i przedmiot recenzji

Recenzja została opracowana na wniosek Dziekana Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej prof. dra hab. inż. Michała Bołtryka, z dnia 25 czerwca 2018 r.

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Gryniwicza, o tytule podanym wyżej, wykonana pod kierunkiem dra hab. inż. Jerzego K. Szlendaka, prof. PB. Zasadnicza część rozprawy liczy 142 strony i wyróżniono w niej 5 rozdziałów oraz spis piśmiennictwa. Jest uzupełniona przez trzy załączniki o objętości 21 stron oraz 4 strony streszczeń w języku polskim i angielskim. Bibliografia zawiera wykaz 99 pozycji literaturowych. W treści rozprawy zamieszczono 112 rysunków, 23 tabele oraz 45 numerowanych wzorów.

2. Ocena tematyki rozprawy

Nowoczesne budownictwo stalowe nie może być obecnie rozwijane bez szerokiego stosowania lekkiej obudowy, której istotną część stanowią blachy profilowane a zwłaszcza trapezowe. Blachy takie są wykorzystywane od wielu lat jako elementy osłonowe i równocześnie nośne. W klasycznym ujęciu blacha trapezowa pełni funkcję przegrody budowlanej, a jej rola nośna jest ograniczona do przejmowania oddziaływań prostopadłych do powierzchni blachy. We współczesnych zastosowaniach, nie rezygnując z tych podstawowych funkcji, wykorzystuje się dodatkowo efekt współpracy tarczowej, czyli

zdolność właściwie wykonanego i zamocowanego poszycia do przenoszenia sił w swojej płaszczyźnie. Współpraca tarczowa poszycia z elementami prętowymi wpływa istotnie zarówno na redystrybucję sił wewnętrznych w szkieletcie stalowym, jak i na jego stany graniczne nośności oraz użyteczności.

Autor w swojej rozprawie zajął się tym ostatnim, najbardziej nowoczesnym aspektem wykorzystania blach trapezowych w budownictwie stalowym, czyli zagadnieniem uwzględnienia wpływu współpracy tarczowej poszycia z konstrukcją prętową podczas analizy globalnej ustroju szkieletowego.

Pomimo, że idea takiej współpracy jest znana od wielu lat, jednak jej wykorzystanie w praktyce projektowej jest niewielkie. Autor trafnie identyfikuje przyczynę takiego stanu rzeczy, którą jest brak uniwersalnego podejścia obliczeniowego, łączącego prostotę i łatwość implementacji we współczesnych pakietach MES do analizy konstrukcji, w szczególności takich, które umożliwiają analizę przestrzenną.

Prezentowana rozprawa jest propozycją autorskiej metody obliczeniowej, służącej do modelowania konstrukcji obiektów z poszyciem w postaci blachy trapezowej. Ukierunkowana jest na następujące zagadnienia:

- opracowanie podstaw metody obliczeniowej szacowania interakcji blach trapezowych ze szkieletem stalowym budynku,
- przedstawienie algorytmu do zautomatyzowanego generowania modeli obliczeniowych obiektów, w których współpraca tarczowa występuje,
- analizę porównawczą modeli obliczeniowych tworzonych według zaproponowanej metody z klasycznymi procedurami obliczeniowymi uwzględniającymi współpracę tarczową,
- analizę podatności wybranych połączeń stosowanych w konstruowaniu tarcz dachowych i ściennych.

Rozpatrywany przez Autora problem naukowy mieści się nurcie współczesnych zagadnień budownictwa stalowego, jest aktualny i celowy. Należy go bardzo wysoko ocenić z punktu widzenia aplikacyjnego i możliwości wykorzystania w praktyce. Wobec dużej konkurencji na rynku konstrukcji stalowych w Polsce i na świecie, uwzględnianie współpracy poszycia z konstrukcją nośną staje się podejściem ekonomicznie coraz bardziej uzasadnionym, a w niedalekiej przyszłości zapewne i niezbędnym.

3. Zawartość rozprawy i uwagi ogólne

Zasadniczym celem rozprawy jest opracowanie i merytoryczne uzasadnienie sposobu umożliwiającego wprowadzenie do globalnej analizy konstrukcji efektu współpracy tarczowej poszycia. Autor rozdziela ten problem na dwa zagadnienia – jedno związane ze sztywnością tarczową samej blachy trapezowej i drugie związane z wpływem połączeń mocujących arkusze blachy trapezowej ze sobą, z płattwiami i z dźwigarami głównymi. Autor rozpatruje powyższe zagadnienie w ujęciu deterministycznym.

W rozdziale pierwszym Autor podaje genezę tematu, istotę współpracy tarczowej poszycia oraz przedstawia opis stanu wiedzy, z uwzględnieniem zagadnień normalizacyjnych i zarysem wdrażania zasad współpracy tarczowej w Polsce. Przedstawiono tu także budowę strukturalną przepon z blach trapezowych i aktualną procedurę obliczenia ich podatności i nośności. Opis ten Autor uzupełnia informacjami na temat możliwości analizy konstrukcji uwzględniającej współpracę tarczową za pomocą pakietów MES i opisuje dotychczasowe osiągnięcia w tej dziedzinie. Autor w obu przypadkach przedstawia istniejące uproszczenia i ograniczenia.

Rozdział zamyka przedstawienie tezy pracy, jej celu i zakresu. Tezą jest stwierdzenie, że płyta ortotropowa, jako model blachy trapezowej, wraz z zastępczym modelowaniem łączników mogą być elementami metody, która umożliwia dokładne i efektywne uwzględnianie obudowy z blach trapezowych w obliczeniach statycznych konstrukcji stalowych. Stosownie do postawionej tezy, Autor określa zakres pracy, który doprowadzi do jej uzasadnienia. Rozdział liczy 35 stron.

Rozdział 2 zawiera opis autorskiej metody modelowania hal stalowych obudowanych blachą trapezową, wraz z jej dostosowaniem do współcześnie stosowanych technik komputerowej analizy konstrukcji. Propozycja Autora opiera się na oddzielnym uwzględnianiu blachy trapezowej jako płyty ortotropowej o parametrach zastępczych i oddzielnym modelowaniu połączeń występujących w rozpatrywanej przeponie. Płyty ortotropowe zastępujące osobno każdy z arkuszy blachy trapezowej są charakteryzowane przez odpowiednio wyznaczone macierze sztywności tarczowej i sztywności na zginanie. W szczególności macierz sztywności tarczowej uwzględnia efekt odkształcenia postaciowego i paczenia konturu blachy trapezowej. Do modelowania połączeń głównych, uszczelniających i pośrednich Autor proponuje podejście, w którym każdy osobny łącznik jest uwzględniony w postaci belkowego elementu wspornikowego, odpowiednio usytuowanego i charakteryzowanego zastępczym momentem bezwładności. W celu łatwego określenia tarczowej macierzy sztywności płyty ortotropowej i zastępczego momentu bezwładności

elementu belkowego uwzględniającego łączniki, Autor przytacza modele analityczne składników wpływających na podatność przepony na ścinanie. Wobec złożoności problemu odwzorowania każdego arkusza blachy trapezowej i każdego łącznika z osobna, Autor przedstawia praktyczny algorytm umożliwiający efektywną budowę struktury tarcz dostosowaną do pakietu ANSYS. Rozdział jest obszerny, liczy 25 stron i wydaje się być kluczowy dla ocenianej rozprawy.

Rozdział 3 jest opisem przeprowadzonych i wykorzystanych w ramach realizacji doktoratu badań doświadczalnych. Badania dotyczą fragmentu tarczy dachowej, hali o wymiarach naturalnych oraz serii połączeń zakładkowych na wkręty samowierjące. Fragment tarczy dachowej reprezentował jednostkową przeponę połaciową o wymiarach 2,34x4,56 m. W tym przypadku Autor wykorzystuje wyniki eksperymentu przeprowadzonego pewien czas temu w jednostce naukowej Autora, lecz bez jego udziału. Pozostałe badania były prowadzone przez Autora lub z jego udziałem. Badania hali w skali naturalnej przewidywało oszacowanie rzeczywistego wpływu obudowy hali na przemieszczenia szkieletu stalowego. Pomiary dotyczyły zachowania hali w trzech stadiach montażu: konstrukcji bez obudowy, konstrukcji pokrytej dachem i konstrukcji w pełni obudowanej. Hala była jednonawowa, zbudowana z pięciu ram słupowo – dźwigarówowych z wiązarami kratowymi i miała wymiary w rzucie 12,0x20,0 m oraz wysokość 6,1 m. Pomiary ograniczone były do wartości zadawanego poziomego obciążenia i przemieszczeń wybranych punktów szkieletu stalowego. Trzecia grupa badań doświadczalnych dotyczyła połączeń zakładkowych na wkręty samowierjące. Obejmowała 7 grup z pięcioma elementami próbnymi w każdej. Grupy zróżnicowane były pod względem grubości nominalnej łączonych blach (od 0,5 do 1,5 mm). Celem badań było oszacowanie podatności połączeń i ich nośności. Wyniki badań zostały wykorzystane do obliczeń porównawczych i symulacji w kolejnym rozdziale. Rozdział ten jest najdłuższy w całej rozprawie, liczy 41 stron co stanowi 29% tekstu zasadniczej części pracy.

W rozdziale 4 Autor przedstawia analizy weryfikacyjne. W pierwszej ich części rozpatruje dwie tarcze (w dachu płatwiowym i bezpłatwiowym), porównując przemieszczenia tych tarcz wyznaczone procedurami analitycznymi, z rezultatami modelowania MES wykorzystującego opracowaną przez siebie metodę. W drugiej części podobna analiza weryfikacyjna wykonana jest w odniesieniu do fragmentu tarczy dachowej, dla której wykonano badania doświadczalne opisane w rozdziale 3. W kolejnej części zamieszczono weryfikację modelowania badanej hali, osobno rozpatrując zachowanie połaci dachowej jako konstrukcji dwuwymiarowej, następnie hali z dachem pokrytym blachą trapezową.

W ostatniej części przedstawiono symulację 3D połączeń zakładkowych blach połączonych wkrętami samowiercącymi, zgodnie z przeprowadzonymi badaniami.

Rozdział 5 (nienumerowany) zawiera podsumowanie rozprawy, wnioski końcowe i podaje możliwe kierunki dalszych badań. Rozprawa kończy się spisem wykorzystanego piśmiennictwa, a trzy załączniki zawierają kod źródłowy programu generującego tarczę dachu płatwiowego w programie ANSYS oraz szczegółowe zestawienie wyników badań hali w skali naturalnej i każdej serii połączeń zakładkowych łączonych wkrętami samowiercącymi.

4. Ocena merytoryczna

Temat rozprawy jest aktualny i odpowiada współczesnym trendom występującym w konstrukcjach metalowych. Co istotne, przedstawiona metoda może zostać wydajnie wykorzystana w praktyce. Zaproponowana przez Autora idea zastąpienia w modelu numerycznym blachy trapezowej zastępczą płytą ortotropową znacząco redukuje wymaganą moc obliczeniową komputera i czas obliczeń, co w rozbudowanych modelach numerycznych jest istotne. Wprowadzenie indywidualnego modelowania łączników pozwala zaś na efektywne uwzględnienie ich wpływu na sztywność tarczową. Wobec pracochłonności osobnego odwzorowania w modelu numerycznym każdego arkusza blachy trapezowej i łącznika z osobna, Autor przedstawia algorytm i generator umożliwiający efektywną budowę struktur tarcz dostosowaną do pakietu ANSYS. Zauważyć należy, że istnieją już publikacje naukowe (por. [49] w spisie bibliograficznym zawartym w dysertacji), które wykorzystują do modelowania współpracy tarczowej podejście zaprezentowane przez Autora.

Tytuł przedstawionej dysertacji jest szczegółowy i dobrze opisuje jej zawartość.

Teza rozprawy jest, zdaniem recenzenta, sformułowana w sposób właściwy i znajduje swoje objaśnienie i uzasadnienie w treści rozprawy. Przedstawiony w rozprawie problem naukowy jest jasno postawiony, a cele są wyraźnie określone.

Do rozwiązania postawionego problemu naukowego Autor podjął działania w następujących obszarach:

- Przegląd stanu rozpatrywanego zagadnienia, analiza i synteza wpływających z tego przeglądu informacji,
- Zaproponowanie metody modelowania współpracy tarczowej w obiektach halowych,
- Przeprowadzenie badań doświadczalnych (a także zebranie wyników dostępnych badań), które stworzą populację wyników do walidacji zaproponowanej metody,
- Walidacja i weryfikacja zaproponowanej metody modelowania współpracy tarczowej przy wykorzystaniu wyników przeprowadzonych i zebranych badań doświadczalnych.

Podejście takie należy ocenić jako właściwe i typowe dla dysertacji doktorskich w dziedzinie konstrukcji stalowych.

Przegląd piśmiennictwa, odniesienie do istniejących na tym polu prac naukowych i przedstawiony stan wiedzy dają dowód bardzo dobrej orientacji Autora w rozpatrywanej przez niego dziedzinie. Zestawione piśmiennictwo jest współczesne. Jedynie 35 pozycji bibliograficznych jest datowanych przed rokiem 2000, a w dużej mierze wynika to z faktu, że podstawy analitycznego ujęcia współpracy tarczowej poszycia opracowywano naukowo w latach 70-tych i 80-tych ubiegłego wieku.

Poziom merytoryczny rozprawy a także logika wyводу są na dobrym poziomie. Autor poprawnie rozdziela problem modelowania współpracy tarczowej na dwa zagadnienia, z których pierwsze związane jest z sztywnością tarczową samej blachy trapezowej a drugie z wpływem na sztywność postaciową tarczy połączeń głównych, pośrednich i uszczelniających. Takie wyodrębnienie cech i właściwości badanego przedmiotu jest oczywiście podstawą naukowej analizy zjawisk, ale też nawiązuje do metody składnikowej, przywoływanej w normie PN-EN 1993-1-8, służącej do projektowania połączeń i węzłów konstrukcji metalowych.

Zdaniem recenzenta do osiągnięć Autora można zaliczyć następujące rezultaty pracy:

- Możliwość praktycznego stosowania przedstawionej metody w analizie globalnej, przy wykorzystaniu współczesnych narzędzi obliczeniowych (jak wspomniano istnieją już prace naukowe wykorzystujące zaproponowane przez Autora podejście).
- Zaproponowana metoda pozwala wyjść poza ograniczenia geometryczne i konstrukcyjne stosowane przy wykorzystywaniu dotychczasowych wzorów analitycznych (takie jak np. prostokątny kształt powłoki, regularny rozstaw płatwi, brak większych otworów itp.).
- Możliwość wyznaczenia rozkładu sił na pojedyncze łączniki i uwzględniania różnego ich rozstawienia. Nośność poprawnie zaprojektowanej przepony zależy od nośności połączeń. Tym samym otrzymany rozkład sił na pojedyncze łączniki może służyć do dokładnego jej wyznaczenia.

Poniżej podano kilka pytań i uwag krytycznych dotyczących merytorycznej zawartości rozprawy:

- Tytuł rozprawy i jej zawartość skierowane są wyłącznie na modelowanie współpracy tarczowej. Wiadomo jednak, że istnieje ścisłe powiązanie pomiędzy analizą globalną a sprawdzaniem stanów granicznych nośności konstrukcji. Czy zaproponowany sposób modelowania tarczowych paneli wpłynie na wartość ich obliczeniowej nośności w porównaniu do dotychczasowego analitycznego podejścia? Zastosowana analiza

sprężysta i modelowanie każdego łącznika z osobna zapewne skutkować będą nierównomiernym rozkładem sił na poszczególne łączniki (jak to zwykle występuje w połączeniach zakładkowych). Jeśli sprawdzanie nośności będzie polegać na porównaniu siły występującej w pojedynczym łączniku z jego nośnością obliczeniową, czy nie różnicuje to globalnej nośności przepony w porównaniu do dotychczas stosowanych wzorów analitycznych, gdzie zakłada się równomierny rozkład sił pomiędzy wszystkie łączniki danego typu.

- Prezentowana metoda modelowania konstrukcji obudowanych blachą trapezową w założeniach ma mieć charakter uniwersalny, lecz wszystkie analizy weryfikacyjne przeprowadzono wyłącznie dla zachowania poszycia jako tarczy. Zdaniem recenzenta warto było podjąć próbę weryfikacji zachowania paneli także przy spełnianiu podstawowej funkcji nośnej, którą jest przeniesienie oddziaływań prostopadłych do powierzchni blachy. W szczególności istotny tu może być wpływ sposobu modelowania łączników uszczelniających w sytuacji, gdy działają obciążenia powierzchniowe o zróżnicowanym rozkładzie na powierzchni panelu.
- Badania doświadczalne całego obiektu są przedsięwzięciami bardzo rzadkimi z uwagi na pracochłonność i koszt ich przeprowadzenia. Należy wobec tego z uznaniem odnieść się do wykonanej przez Autora (i cały zespół) pracy badawczej dotyczącej pomiarów na rzeczywistej konstrukcji a także podkreślić wagę uzyskanych w ten sposób wyników. Z pewnym żalem trzeba jednak stwierdzić, że podczas tych i pozostałych zaprezentowanych w pracy badań ograniczono się wyłącznie do pomiaru globalnych przykładanych obciążeń i globalnych powstających przemieszczeń. Te wyniki są oczywiście bardzo istotne, ale nie dają możliwości szczegółowego wglądu w zachowanie konstrukcji. Z naukowego punktu widzenia pożądane byłyby dodatkowe pomiary, jak np. pomiar odkształceń w wybranych punktach oraz pomiar lokalnych względnych przemieszczeń pomiędzy poszczególnymi składnikami tworzącymi przeponę i konstrukcję prętową. W przypadku badanego rzeczywistego obiektu jest to tym bardziej istotne, ponieważ występowały w nim zarówno stężenia kratowe, jak i tarcza dachu.
- Jakie są ostateczne zalecenia Autora co do długości zastępczych elementów belkowych modelujących łączniki główne? Według rysunku 31 mogą one uzyskiwać spore rozmiary (od osi płatwi do powierzchni środkowej blachy trapezowej), natomiast na stronie 58 Autor pisze, że takie długości „mogą generować drugorzędne siły wewnętrzne”.

- Kolejność prezentacji badań doświadczalnych oraz kolejność analiz weryfikacyjnych przedstawione w dysertacji nie są zgodne z zasadami walidacji hierarchicznej (zalecaną kolejnością jest przechodzenie od szczegółu do ogółu).

5. Ocena formalnej postaci rozprawy

Praca jest napisana starannie, poprawną polszczyzną, z dbałością o stosowaną terminologię. Lapsusy czy niezręczności językowe są bardzo nieliczne. Pewne usterki językowe zostały przedyskutowane bezpośrednio z Autorem. Struktura pracy jest poprawna, rozdziały są dobrze wydzielone, wszystkie posiadają podobną liczbę stron, poza ostatnim rozdziałem zamykającym.

Do zauważalnych mankamentów związanych z formalną postacią rozprawy można zaliczyć następujące:

- Niezręczności z odwołaniami do rysunków – w niektórych przypadkach w tekście występuje najpierw odwołanie do rysunku późniejszego, a w dalszej kolejności odwołanie do rysunku wcześniejszego (por. np. str. 42, 66, 69, 76, 96). Brak jest odwołań w tekście do rysunków 68-70.
- Strona 15 – norma PN-EN ISO 12944-2 ustala kategorie korozyjności atmosfery a nie „klasy korozyjności”.
- Zasada płaskich przekrojów jest zwykle nazywana zasadą Eulera-Bernoulliego, a nie Timoshenki, jak na stronie 58.
- Strona 94 (wiersz 1g) - jest „nośność”, powinno być „wytrzymałość”.
- Strona 100 – jest „statycznych” (wiersz 10d), a powinno być „statystycznych”.
- Strona 101, tablica 11 – zastosowano kropki jako separatory dziesiętne, podczas, gdy w pozostałej części pracy występują przecinki.
- Kod źródłowy zamieszczony w Załączniku 1, jest błędnie nazwany algorytmem.
- Dodatkowa analiza weryfikacyjna zamieszczona w podsumowaniu (rozdział 5) powinna znaleźć miejsce w rozdziale 4.
- Zdaniem recenzenta do bibliografii można było dołączyć monografię A. Reichharta „Kształtowanie geometryczne i konstrukcyjne powłok z blach fałdowych”, Rzeszów 2002.

6. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Gryniwicza rozwiązuje oryginalne zadanie naukowe dotyczące uwzględniania w analizie globalnej konstrukcji współpracy

tarczowej. Temat rozprawy wypływa ze współczesnej praktyki inżynierskiej i ma znaczenie praktyczne. Autor dokonał przeglądu stanu zagadnienia, zaproponował metodę modelowania współpracy tarczowej w obiektach z poszyciem z blachy trapezowej, przeprowadził badania doświadczalne (w tym obiektu w skali naturalnej) a następnie zweryfikował na ich podstawie poprawność zaproponowanej metody. Zdaniem recenzenta założony w rozprawie cel został osiągnięty.

Autor wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną dotyczącą konstrukcji stalowych. Wykazał się także umiejętnością prowadzenia badań doświadczalnych oraz komputerowej analizy konstrukcji.

Uwagi krytyczne przedstawione w poprzednim punkcie mają charakter dyskusyjny oraz porządkujący i nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy.

Biorąc powyższe pod uwagę, uważam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi odnośnie prac doktorskich zawarte w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. 2003 nr 65 poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami). Wnioskuje o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.



