

prof. dr hab. inż. Marian Giżejowski, prof. zw. PW
Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej
Instytut Inżynierii Budowlanej, Zespół Konstrukcji Metalowych
al. Lecha Kaczyńskiego 16
00-637 Warszawa

Warszawa 6.09.2018 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Gryniwicza pt.
„Metoda modelowania konstrukcji hal stalowych obudowanych blachą trapezową”

1. Podstawa formalna opracowania i przedmiot recenzji

Recenzja została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej prof. dra hab. inż. Michała Bołtryka, prof. zw. PB, z dnia 25 czerwca 2018 r. Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Gryniwicza, o tytule podanym w nagłówku, wykonana pod kierunkiem dra hab. inż. Jerzego K. Szlendaka, prof. PB.

Zasadnicza część rozprawy licząca 142 strony (spis treści, treść podzielona na 5 rozdziałów oraz bibliografia) została uzupełniona o nienumerowaną część, którą tworzą Załączniki A, B i C o objętości 21 stron oraz dwa dwustronicowe streszczenia (w językach polskim i angielskim). Bibliografia zawiera wykaz 99 pozycji literaturowych. W treści rozprawy zamieszczono 112 rysunków, 23 tabele oraz 45 numerowanych wzorów.

2. Tematyka recenzowanej rozprawy

Lekka obudowa halowych konstrukcji stalowych występuje w postaci poszycia z blach profilowanych na zimno (najczęściej blach fałdowych) lub warstwowych płyt okładzinowych, mocowanych bezpośrednio do szkieletu konstrukcji nośnej lub mocowanych pośrednio, w wypadku obudowy płatwiowo-ryglowej. Poszycie pełni funkcję przegrody budowlanej i jest tradycyjnie projektowane tak, aby bezpiecznie przejąć oddziaływania klimatyczne oraz środowiskowe i przekazać te oddziaływania na konstrukcję nośną. Jeżeli obudowa mocowana jest na trwałe do konstrukcji nośnej, a jej połączenia są zdolne do przeniesienia sił stabilizujących, to poszycie pełni pomocniczą rolę konstrukcyjną w odniesieniu do elementów szkieletu nośnego, gdyż można je traktować jako podparte boczne lub boczne i przeciwskrętne. Rola konstrukcyjna poszycia ogranicza się w tym wypadku do roli tężnika zasadniczych elementów szkieletu stalowej konstrukcji nośnej (słupów, rygli), bez udziału w dystrybucji sił wewnętrznych. Poszycie pomija się wówczas przy ocenie przestrzennej sztywności i stateczności konstrukcji nośnej budynku, a konstrukcja wymaga odpowiedniego stężenia w płaszczyźnie dachu i ścian.

Dążenie do optymalizacji zużycia materiału sprawiło, że we współcześnie realizowanych budynkach halowych dąży się do pełniejszego wykorzystania właściwości strukturalnych poszycia oraz do uwzględnienia jego współpracy tarczowo-płytywowej w analizie przestrzennego zachowania się ustroju nośnego hali. Dzięki temu można:

- 1) ograniczyć liczbę stężeń do minimalnej, jaka jest potrzebna do zapewnienia sztywności i geometrycznej niezmienności prętowego lub prętowo-ciężnowego szkieletu konstrukcji nośnej na etapie montażu,
- 2) uwzględnić właściwości strukturalne poszycia w analizie statycznej konstrukcji obiektu traktowanego jako ustrój mieszany, przy wyznaczaniu dystrybucji sił przekrojowych między elementami prętowymi i tarczowo-płytywymi lub prętowo-ciężnowymi i tarczowo-płytywymi.

W badaniach naukowych przedstawionych w recenzowanej rozprawie, Autor skoncentrował się na wybranych zagadnieniach związanych z modelowaniem przestrzennej współpracy poszycia w postaci blach trapezowych ze szkieletem nośnym parterowych hal stalowych. Szkielet konstrukcji nośnej wraz ze stężeniami modelowano jako podukład prętowy, poszycie zaś jako podukład tarczowo-płytowy złożony płaskich elementów ortotropowych o zastępczych właściwościach generowanych na podstawie cech profilu blachy fałdowej. Zrealizowane badania mają cechy nowoczesnego podejścia naukowego, w którym wyniki uzyskane z proponowanych modeli teoretycznych są weryfikowane na podstawie porównania z wynikami uzyskanymi z modeli uproszczonych - w wypadku Autora są to różne modele ujęte w wytycznych Europejskiej Konwencji Konstrukcji Stalowych (ECCS), a także są walidowane na podstawie porównania z wynikami uzyskanymi z badań doświadczalnych - w wypadku Autora są to badania laboratoryjne fragmentu poszycia i badania połączeń zakładkowych blach oraz badania połowe zrealizowane na rzeczywistym obiekcie hali w różnych etapach jego budowy, tj. w odniesieniu do konstrukcji bez obudowy, konstrukcji z częściową obudową (poszycie dachu) oraz konstrukcji w warunkach pełnej obudowy (poszycie dachu oraz ścian bocznych i szczytowych). Zaproponowane modele obliczeniowe poszycia zostały zalgorytmizowane i zaimplementowane jako generator tarczy dachu płaskiego do programu numerycznego wspomagającego obliczenia w zakresie:

- 1) wyznaczenia pola sił wewnętrznych w elementach szkieletu prętowego, a także w elementach tarczowych poszycia i ich łącznikach,
- 2) wyznaczenia przemieszczeń w charakterystycznych węzłach szkieletu, służących do oceny wpływu poszycia na przestrzenną sztywność konstrukcji nośnej hali na różnych etapach jej budowy.

Zrealizowany przez Kandydata zakres badań został poprzedzony wnikliwym rozpoznaniem literatury, która jest już dość bogata. Na podstawie syntezy aktualnego stanu wiedzy, ze szczególnym uwzględnieniem metod obliczeniowych stosowanych w praktyce inżynierskiej, Autor trafnie zdefiniował cel pracy i zakres badań umożliwiające realizację założonego celu. Podjął w rozprawie ważne zagadnienie współpracy poszycia ze stalowym szkieletem hali, podejmując próbę zastosowania nowoczesnego podejścia hierarchicznego do tworzenia modeli mechanicznych oraz oceny ich wiarygodności na podstawie analiz weryfikacyjno-walidacyjnych, poczynawszy od modeli lokalnych - tarczy, łącznika oraz połączenia tarczy, aż do globalnego modelu konstrukcji, odtwarzającego stany zachowania się obiektu rzeczywistego na różnych etapach budowy.

Recenzowana rozprawa, aczkolwiek nie daje definitywnej odpowiedzi na pytanie o wiarygodność zaproponowanej metody modelowania stanów granicznych nośności i użytkowości stalowych konstrukcji hal obudowanych poszyciem, przyczyniła się niewątpliwie do postępu w zrozumieniu skomplikowanych zagadnień interakcji między prętowymi i powierzchniowymi elementami konstrukcji, oraz ich połączeniami, w przenoszeniu oddziaływań i ocenie przestrzennej sztywności konstrukcji. Rozpatrywana przez Autora problematyka naukowa i podejście do badań w ramach tej problematyki są dostosowane do współczesnych potrzeb nakreślonych przez wyzwania, przed którymi stoi budownictwo stalowe. Aby sprostać wyzwaniom konkurencyjności na rynku międzynarodowym, uwzględnianie na etapie projektowania współpracy poszycia z konstrukcją nośną hali powinno być podejściem standardowym. Wyniki badań zrealizowanych przez Autora przybliżają nas do chwili, gdy możliwe będzie wdrożenie do praktyki inżynierskiej narzędzi komputerowego wspomaganie projektowania konstrukcji hal na podstawie globalnej analizy, uwzględniającej współpracę poszycia ze szkieletem nośnym. Należy jednak podkreślić fakt, że badania Autora dotyczą zagadnień doraźnej nośności i użytkowości konstrukcji szkieletowych z uwzględnieniem efektu przestrzennej współpracy obudowy. Oddziaływania klimatyczne i środowiskowe mają cechy obciążeń wielokrotnie powtarzalnych, niekiedy z efektami dynamicznymi od porywów wiatru, a więc projektant powinien ten fakt uwzględnić w projektowaniu, a właściciel zapewnić pełną zdolność właściwie wykonanego i zamocowanego poszycia do przenoszenia efektów oddziaływań w całym okresie przewidywanego użytkowania obiektu.

3. Uwagi ogólne i ocena merytoryczna

Zagadnienia globalnej analizy konstrukcji rozpatrywane są przez Autora w kontekście deterministycznej oceny doraźnej nośności i stanu deformacji z uwzględnieniem efektu współpracy tarczowej poszycia z blachy fałdowej oraz odkształcalności zarówno łączników uszczelniających, mocujących arkusze blachy ze sobą, jak i łączników głównych, mocujących blachę do płatwi dachowych i rygli ściennych lub mocujących blachę bezpośrednio do elementów szkieletu nośnego hali.

Propozycja Autora opiera się na wykorzystaniu możliwości komercyjnego programu ANSYS zintegrowanego z autorską procedurą umożliwiającą uwzględnienie właściwości strukturalnych poszycia oraz łączników mocujących poszycie do konstrukcji wsporczej. Blacha profilowana poszycia zastępowana jest do celów obliczeniowych przez płaski element powierzchniowy o parametrach zastępczej przepony ortotropowej i oddzielnym modelowaniu połączeń występujących w rozpatrywanej przeponie. Macierze sztywności tarczowej i sztywności zgięciowej ortotropowej przepony uwzględniają efekty odkształcenia postaciowego oraz odkształcenia konturu blachy fałdowej, co umożliwia dokładniejsze odzwierciedlenie zjawisk występujących w rzeczywistym poszyciu pod wpływem efektów oddziaływań o kierunku normalnym do jego powierzchni oraz odkształceń postaciowych występujących w jego płaszczyźnie. Macierze definiowane są w początkowej konfiguracji odniesienia oraz dotyczą zakresu sprężystego zachowania się stali poszycia oraz konstrukcji szkieletu, a także liniowej charakterystyki łączników poszycia. Opracowany model obliczeniowy jest ukierunkowany na praktyczne wdrożenie do projektowania, a więc wyznaczenie efektów oddziaływań na podstawie analizy liniowej (LA). Analiza liniowa ogranicza zakres wyężenia elementów oraz zakres akceptowalnych przemieszczeń ustroju i zapewnia bezpieczne użytkowanie obiektu halowego w normalnych warunkach eksploatacji pod wpływem powtórzeń oddziaływań charakterystycznych o różnej kombinacji.

Należy wyraźnie zaznaczyć, że badania Autora nie uwzględniają modelowania zjawisk nieliniowych prowadzących do zniszczenia doraźnego lub postępującego w czasie, a więc zjawisk, które wymagają analiz nieliniowych geometrycznie i materiałowo (GMNA lub GMNIA) oraz uwzględnienia niestateczności cienkich blach poszycia i redystrybucji sił wewnętrznych między elementami poszycia, szkieletu i ich łącznikami, zachodzącej podczas sprężysto-plastycznej fazy pracy stali oraz nieliniowego zachowania się łączników i ich niszczenia pod wpływem lokalnych zjawisk zachodzących w połączeniu. Przy modelowaniu połączeń głównych, uszczelniających i pośrednich Autor proponuje podejście, w którym każdy łącznik jest reprezentowany przez wspornikowy element belkowy o zastępczej charakterystyce liniowej z uwagi na zginanie. Autor proponuje zastosowanie tego samego modelu łącznika do opisu zachowania się połączeń głównych oraz uszczelniających. Stosowanie takiego samego modelu łącznika zarówno w odniesieniu do połączeń głównych, jak i w odniesieniu do połączeń uszczelniających jest pewnym uproszczeniem, które może prowadzić do oceny sił wewnętrznych i przemieszczeń z błędem trudnym do oszacowania a priori. Oba typy połączeń różnią się bowiem charakterem pracy łącznika, a więc ich odkształceniowe charakterystyki będą odmienne.

Zaproponowane podejście, wykorzystujące niezależne odwzorowania blachy poszycia oraz łącznika, jest utrudnieniem w praktycznej realizacji złożonych zadań obliczeniowych konstrukcji obiektu obudowanego, z uwagi na występowanie dużej liczby łączników oraz różnych warunków brzegowych przepon poszycia, wynikających z występowania otworów dachowych i/lub ściennych. Kluczową sprawą w sensie praktycznego wdrożenia autorskiej metody projektowania jest możliwość zalgorytmizowania obliczeń przez stworzenie na etapie preprocesingu powtarzalnego superelementu poszycia. Autor przedstawił praktyczny algorytm umożliwiający efektywną budowę powtarzalnej struktury poszycia, dostosowaną do pakietu ANSYS, oraz automatyzację zszycia tych struktur, zapewniającą ciągłość skończenie-elementowego modelu konstrukcji, odtwarzającego współpracę szkieletu i obudowy. Tę

część rozprawy uważam za najważniejsze osiągnięcie Autora, poza badaniami doświadczalnymi zrealizowanymi na potrzeby walidacji modelu.

Badania doświadczalne, prowadzone przez Autora lub z jego udziałem, posłużyły do walidacji przestrzennego modelu konstrukcji z uwzględnieniem właściwości strukturalnych obudowy i jej połączeń. Wyróżnić można trzy poziomy walidacji:

- poziom 1: walidacja modelu łącznika na podstawie laboratoryjnych badań doświadczalnych zakładkowych połączeń blach cienkich na wkręty samowierzące,
- poziom 2: walidacja modelu segmentu poszycia na podstawie laboratoryjnych badań doświadczalnych fragmentu dachu złożonego z blachy faldowej, rygli i płatwi oraz połączeń głównych i uszczelniających,
- poziom 3: walidacja modelu konstrukcji hali na podstawie połowych badań doświadczalnych zrealizowanych na trzech etapach budowy, mianowicie konstrukcji bez obudowy, konstrukcji z pokryciem dachowym i konstrukcji z obudową dachu oraz ścian podłużnych i szczytowych.

W rozumieniu hierarchicznej procedury walidacji modelu obliczeniowego, realizacja programu badań oraz przedstawienie wyników badań w rozprawie powinny być uporządkowane od badań poziomu 1 do badań poziomu 3. Zwalidowany model łącznika w postaci dwuliniowych oraz trójliniowych zależności siła przypadająca na łącznik oraz przemieszczenie łącznika, powinien być wykorzystany do walidacji modelu segmentu poszycia, a zwalidowany model segmentu poszycia pozwoliłby na poprawną walidację modelu konstrukcji hali współpracującej z poszyciem dachu oraz ścian. Postępując w ten sposób można wyeliminować niedokładności modelu na każdym etapie walidacji oraz zapewnić, że model całej konstrukcji odtwarza w sposób najbardziej wiarygodny zachowanie się obiektu fizycznego.

Z lektury rozprawy nie wynika bezpośrednio, że Autor postępował zgodnie z procedurą walidacji hierarchicznej. Pojawiają się wątpliwości, czy do walidacji i weryfikacji modelu segmentu poszycia przyjmowano sztywności łączników zgodnie z analityczną procedurą eurokodową, czy też przyjęty przez Autora model poszycia zbadanego eksperymentalnie uwzględnił autorskie modele zachowania się łączników. Na podstawie walidacji, dotyczącej porównania tylko jednego pomierzonego przemieszczenia wybranego punktu segmentu, wyciągnięto wniosek, że wyniki uzyskane z różnych metod obliczeniowych (autorskiej, analitycznej według wytycznych ECCS oraz numerycznej z wykorzystaniem programu ROBOT) są porównywalne z wynikiem eksperymentu. Przemieszczenie uzyskane z modeli jest zawyżone o ok. 30% w stosunku do przemieszczenia pomierzonego w badaniach eksperymentalnych. Walidacja modelu całej konstrukcji wykazała natomiast, że w wypadku hali z poszyciem dachu wartość przemieszczenia z autorskiego modelu trójwymiarowego jest zaniżona o ok. 13%, natomiast w odniesieniu do hali z poszyciem dachu oraz ścian jest zawyżona o ok. 50%. Przedstawione porównania nie dają jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o wiarygodność opracowanego modelu współpracy poszycia z konstrukcją nośną hali w odniesieniu do ilościowej oceny wpływu obudowy na przemieszczenia konstrukcji.

Mimo wymienionych wyżej uwag krytycznych, recenzowana rozprawa doktorska ma cechy nowatorskie, polegające na udoskonaleniu stosowanych dotychczas modeli obliczeniowych, w tym ujętego w wytycznych ECCS oraz modeli numerycznych zaczerpniętych z literatury. Z uwagi na skomplikowane profile blach trapezowych oraz dużą liczbę elementów powłokowych wymaganą do odtworzenia geometrii poszycia, jedynym racjonalnym postępowaniem jest zastąpienie w modelu obliczeniowym blachy trapezowej płaską strukturą ortotropową. Autor zbudował taki model w powiązaniu z indywidualnym modelowaniem łączników, co umożliwiło uwzględnienie najistotniejszych czynników wpływających na przestrzenną sztywność konstrukcji hali, dystrybucję sił w elementach prętowych oraz tarczowych, a także na deformacje ustroju. Należy jednak zauważyć, że zaproponowany przez Autora model numeryczny został tylko częściowo zwalidowany na podstawie badań dotyczących wyłącznie tarczowej pracy poszycia. Tarczowa praca poszycia będzie zaburzona w wyniku zginania blachy

faldowej od oddziaływań wiatru na dach oraz ściany i/lub śniegu zalegającego na połaci dachowej. Pojawia się pytanie, czy opracowany model obliczeniowy może być efektywnie wykorzystany do symulowania zachowania się konstrukcji, w której blacha faldowa i łączniki poddane są złożonym efektom oddziaływań.

Podsumowując stwierdzam, że do osiągnięć Autora można zaliczyć:

1. Stworzenie udoskonalonego modelu obliczeniowego pozwalającego na liniową analizę globalną konstrukcji hal z uwzględnieniem przestrzennej współpracy poszycia.
2. Udział w przeprowadzeniu szerokiego zakresu badań doświadczalnych, obejmującego zachowanie się połączeń blach cienkich, segmentów poszycia oraz całego obiektu bez obudowy, z obudową częściową oraz z obudową połaci dachowej oraz ścian, poddanych oddziaływaniom wymuszającym stan tarczowy poszycia.
3. Próbę weryfikacji i walidacji opracowanego modelu, chociaż zakres walidacji modelu uważam za zbyt ubogi, gdyż dotyczył jedynie porównania przemieszczenia wybranego punktu konstrukcji, bez porównania ścieżki równowagi, sił w poszyciu oraz w łącznikach.
4. Stworzenie podstaw naukowych metody modelowania, która może być wykorzystana do optymalizacji rozstawu łączników w celu uzyskania ich równomiernego wyłączenia w różnych stanach obciążenia. Ten kierunek badań uważam za najbardziej pożądany wraz z oceną wiarygodności modelowania na podstawie bardziej szczegółowej walidacji modelu.

Oprócz przedstawionych wyżej uwag ogólnych, recenzent zauważył w tekście usterki językowe, nieprecyzyjne lub dyskusyjne sformułowania, wyrażenia potocznie uważane za żargon, które nie powinny być używane w opracowaniach o charakterze naukowym. Uwagi tego typu prześle bezpośrednio Kandydatowi, aby mogły być wykorzystane w późniejszej pracy badawczej.

4. Podsumowanie oraz wniosek końcowy

Przedstawione w recenzji osiągnięcia Kandydata pozwalają na pozytywną ocenę merytoryczną rozprawy, a przedstawione uwagi krytyczne lub wątpliwości recenzenta powinny być wyjaśnione podczas dyskusji w trakcie publicznej obrony rozprawy.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej, Kandydat do awansu naukowego na stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie budownictwo przeprowadził oryginalne badania i analizy dotyczące ważnego problemu naukowego, jakim jest modelowanie współpracy tarczowej poszycia z blachy trapezowej z konstrukcją szkieletu nośnego hal stalowych, przeprowadził samodzielnie lub we współpracy wielkoskalowe badania doświadczalne w laboratorium oraz badania polowe konstrukcji w skali technicznej, a także podjął próbę weryfikacji oraz walidacji zaproponowanego modelu numerycznego, wykazując się:

a) ogólną wiedzą teoretyczną i praktyczną z zakresu mechaniki ustrojów o mieszanej konstrukcji nośnej oraz z zakresu numerycznej analizy konstrukcji stalowych w ujęciu liniowego sformułowania MES, w tym wykazał się umiejętnością tworzenia algorytmów automatycznego generowania powtarzalnego segmentu modelu,

b) wiedzą praktyczną z zakresu modelowania i deterministycznej analizy idealnych konstrukcji prętowo-tarczowych.

Autor rozpoznał aktualny stan wiedzy w tematyce objętej rozprawą, sformułował problem badawczy oraz wykazał się umiejętnością prowadzenia badań w zakresie odpowiednim do nakreślonego celu rozprawy, a także w zakresie zastosowanej metodologii badań i sposobu wnioskowania.

Powyższe oznacza, że recenzowana praca doktorska spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65. poz. 595 z późniejszymi zmianami), a w związku z tym wnioskuję o przyjęcie rozprawy oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Miejowski