

Prof. dr hab. inż. Marian Giżejowski, prof. zw. PW
Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej
al. Armii Ludowej 16
00-637 Warszawa
e-mail: m.gizejowski@il.pw.edu.pl

Warszawa, 30.04.2021 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Górskiego pt. *Współpraca poszycia z płyt warstwowych ze stalową konstrukcją nośną*

1. Podstawa opracowania

Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 17 lutego 2021 roku (pismo przewodniczącego prof. dr hab. inż. Tomasza Siwowskiego z dnia 19 lutego 2021 roku).

2. Zawartość rozprawy doktorskiej

Rozprawa zawarta jest na 239 stronach, w tym wykaz symboli i oznaczeń oraz 6 rozdziałów, z których ostatni jest bibliografią zawierającą 155 pozycji (bez podziału na literaturę oraz normy i wytyczne). Rozprawa nie zawiera streszczeń, ani w języku polskim, ani angielskim.

Rozdział 1: Wprowadzenie, o objętości 3 stron, zawiera informacje dotyczące rozwiązań poszycia dachów hal stalowych, w szczególności roli płyt warstwowych do bocznej i przeciwskrętnej stabilizacji elementów przekazujących obciążenie z poszycia na główne ustroje nośne hal. Omówiono zakres rozprawy oraz zawartość poszczególnych rozdziałów. Zdefiniowano problem naukowy, który dotyczy zbadania możliwości efektywnej współpracy poszycia z płyt warstwowych z konstrukcją oraz wykorzystania tego typu poszycia do skutecznego zabezpieczenia płatwi przed zwichrzeniem. Tezy pracy sformułowano w dwóch aspektach: 1) oceny skuteczności stosowanych obecnie rozwiązań konstrukcyjnych poszycia z płyt warstwowych pod kątem jego współpracy z konstrukcją nośną oraz 2) modyfikacji rozwiązań konstrukcyjnych płyt warstwowych w kierunku podniesienia efektywności przenoszenia obciążeń w płaszczyźnie dachu, w szczególności wynikających ze stabilizacji płatwi z uwagi na zwichrzenie.

Praca ukierunkowana jest na zagadnienia współpracy płyt warstwowych z konstrukcją stalową z kształtowników walcowanych. Recenzent uważa, że rozdział 1 należałoby zmodyfikować, uzupełniając o założenia dotyczące m. in. typu rozważanych w pracy elementów współpracujących z poszyciem, a także o omówienie metodyki weryfikacji założonych tez.

Rozdział 2: Stan wiedzy, o objętości 24 stron (w tym 16 rysunków i 2 tablice), zawiera omówienie aktualnego stanu wiedzy w zakresie współpracy poszycia z konstrukcją, a także

metod obliczeniowych pozwalających na uwzględnienie tarczowej sztywności oraz nośności poszycia w projektowaniu elementów konstrukcji wsporczej.

Rozdział nie jest opatrzony podsumowaniem dotyczącym wniosków z syntezy aktualnego stanu wiedzy, co nie ułatwia czytelnikowi oceny zakresu oraz zasadności badań podjętych przez Autora w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Rozdział 3: Analiza obliczeniowa aktualnych rozwiązań, o objętości 86 stron (w tym 93 rysunki i 13 tablic), jest pierwszym z zasadniczych rozdziałów pracy. Zawiera informacje dotyczące sztywności tarczowej poszycia, sztywności połączenia z konstrukcją wsporcą oraz sztywności skrętnej poszycia. Podano wymagania eurokodu PN-EN 1993, część 1-1 i stabilizowano wartości wymagane do pełnej stabilizacji elementu z uwagi na zwichrzenie. Przedstawiono schemat stanowiska do badań parametrów sztywności pojedynczego łącznika mechanicznego (wkręta) oraz wyniki badań z uwzględnieniem obciążenia zmieniającego się od zera do kilku wartości ich górnej granicy. Zauważono, że przy pewnej wartości górnej granicy obciążenia następuje proces niszczenia blachy stanowiącej okładzinę płyty warstwowej. Na podstawie badań wyznaczono sztywność i nośność pojedynczego łącznika, a także oceniono sztywność tarczową poszycia z płyt warstwowych.

Na wstępie analizowano wpływ sztywności pełno-nośnego poszycia na zwichrzenie płatwi, tzn. przypadki, gdy zintegrowana nośność połączenia i poszycia jest większa niż nośność z uwagi na zwichrzenie płatwi usztywnionej bocznie i/lub przeciwskrętnie. Przedstawiono wyniki obliczeń momentu krytycznego elementu zginanego, tzn. płatwi swobodnie podpartej oraz izolowanego przęsła skrajnego lub przedskrajnego płatwi wieloprzęsłowej. Elementy są stabilizowane bocznie usztywnieniem ciągłym o zmiennej wartości sztywności poszycia. Następnie analizowano wpływ sztywności na nośność belki definiowanej w sposób analogiczny jak w PN-EN 1993-1-1, tzn. $M_{ult} = \chi_{LT} W_{pl} f_y$. Współczynnik redukcyjny z uwagi na zwichrzenie wyznaczono wg procedury eurokodowej, na podstawie momentu krytycznego wyznaczonego z programu LTBeam w odniesieniu do belki swobodnie podpartej: a) usztywnionej bocznie, o sztywności translacyjnej wyliczonej na podstawie badań pojedynczego łącznika, b) usztywnionej przeciwskrętnie, o sztywności skrętnej odnoszącej się do płyt warstwowych z rdzeniem z pianki poliuretanowej, c) usztywnionej w sposób będący kombinacją a) i b). Stwierdzono znacznie większy wpływ usztywnienia bocznego na stabilizację płatwi, co jest faktem znanym z literatury.

W następnej kolejności analizowano znacznie bardziej interesujące przypadki płatwi podpartej bocznie poszyciem sztywnym lub podatnym o ograniczonej nośności połączenia. Zbudowano „powłokowo-kratownicowy” model MES płatwi i jej połączeń z poszyciem. Płatew była obciążona równomiernie obciążeniem q_z , z połączeniami o liniowej charakterystyce łącznika i sztywności początkowej $s_v = 2,4$ kN/mm oraz dwuliniowej charakterystyce $F-A$, gdzie $F_{ult} = 1,5$ kN i sztywność początkowa $s_v = 2,4$ kN/mm. Analiza GMNIA wykazała, że nośność płatwi z liniową charakterystyką połączenia odpowiada równomiernie rozłożonemu obciążeniu $q_{z,ult} = 5,2$ kN/m, z ograniczoną nośnością połączenia zaś odpowiada równomiernie rozłożonemu obciążeniu $q_{z,ult} = 3,5$ kN/m. Otrzymane w ten sposób wartości nośności płatwi $M_{ult,GMNIA}$ wynoszą odpowiednio 52,6 kNm i 35,4 kNm

(korespondują z wartościami nośności przy zwichrzeniu $M_{ult} = \chi_{LT} W_{yf}$ wyznaczonej analitycznie).

W dalszej kolejności, Autor podjął w rozdziale 3 dyskusję zagadnień trwałości połączeń, a raczej stabilności cech mechanicznych połączeń w wyniku cykliczności oddziaływań i zmienności parametrów programu obciążenia. Analizowano wpływ owalizacji otworów na nośność kształtownika giętego w zależności od początkowego luzu łącznika w otworach. Stwierdzono, że zwiększanie luzu w połączeniu jest równoznaczne z obniżeniem zdolności płatwi do przenoszenia obciążeń, maksymalnie o 5% na każdy milimetr luzu. Przytoczony przykład nie dotyczy głównego wątku rozprawy, a więc współpracy kształtowników walcowanych z poszyciem. Zasadne jest pytanie, czy wnioski z tego typu analizy można bezpośrednio przenieść na płatwie z dwuteowego kształtownika walcowanego? Grubość pasa dwuteownika jest bowiem znacznie większa niż grubość półki kształtownika giętego.

Na zakończenie rozdziału przedstawiono badania doświadczalne fragmentu poszycia, a następnie jego model numeryczny. Porównano wyniki eksperymentalne i numeryczne. Szkoda, że Autor nie wyodrębnił zagadnień związanych z badaniami doświadczalnymi oraz budową i walidacją modelu numerycznego jako oddzielny rozdział.

Zapoznając się z rozdziałem nietrudno oprzeć się wrażeniu, że jego tytuł „analiza obliczeniowa” nie odpowiada materiałowi w nim zawartemu. Przeplatają się wątki analiz numerycznych, modeli analitycznych oraz badań doświadczalnych fragmentu poszycia. Autor porusza szereg ważnych wątków, których rozstrzygnięcie ma istotne znaczenie praktyczne. Mnogość poruszanych wątków sprawia jednak, że niektóre z nich są omawiane wycinkowo, odnoszą się do zróżnicowanych elementów i są opatrzone zbyt lakonicznym komentarzem. Brak artykułowania ważnych założeń do analiz i odniesienia wyników do zasadniczego wątku rozprawy, a także brak podsumowania i wniosków z badań prezentowanych w obszernym rozdziale 3 nie pomaga czytelnikowi w śledzeniu myśli przewodniej rozprawy.

Rozdział 4: *Propozycje nowych rozwiązań*, o objętości 103 stron (w tym 96 rysunków i 9 tablic), jest drugim z kolei zasadniczym rozdziałem pracy. Autor podjął w tym rozdziale badania zmierzające do zaproponowania innych, niż istniejące, sposobów kształtowania rozwiązań konstrukcyjnych płyt warstwowych i ich połączeń. W wyniku badań doświadczalnych i/lub analiz numerycznych nowych rozwiązań, dokonano oceny ich przydatności pod kątem zapewnienia pełnej współpracy poszycia z konstrukcją nośną, nie tylko z uwagi na zabezpieczenie elementów konstrukcji nośnej przed giętno-skrętnymi formami utraty stateczności (klasa konstrukcyjna II), ale również z uwagi na traktowanie poszycia jako elementu konstrukcji nośnej (klasa konstrukcyjna I). Zaproponowano rozwiązania polegające na: 1) modyfikacji zalecanych obecnie sposobów łączenia, bez zmiany geometrii i konstrukcji płyt warstwowych oferowanych obecnie na rynku wyrobów budowlanych, 2) propozycji nowych rozwiązań konstrukcyjnych płyt warstwowych i/lub ich sposobów łączenia, w kierunku wprowadzenia na rynek wyrobów budowlanych produktów o cechach innowacyjnych. Analizowano następujące propozycje: a) zwiększenie liczby mechanicznych łączników głównych, b) zastosowanie dodatkowych elementów łączących blachy dolnej okładziny, c) wprowadzenie innowacyjnego łącznika sztywnego,

umożliwiającego włączenie górnej okładziny płyt warstwowych do współpracy z okładziną dolną w celu uzyskania większej sztywności tarczowej płyty warstwowej, d) zastąpienie połączeń na łączniki mechaniczne połączeniami klejowymi (w rozprawie stosuje się również określenie „połączenia klejone”, np. w tytule podrozdziału 4.4, co zdaniem recenzenta nie jest terminologicznie poprawne), e) zmiana rozwiązania konstrukcyjnego zamka blach dolnej okładziny płyty warstwowej, f) wprowadzenie innowacyjnego sposobu poprzecznego profilowania zamków. Niektóre z wymienionych wyżej sposobów podwyższenia efektywności współpracy płyt warstwowych z konstrukcją nośną omówiono jedynie pod kątem zalet i wad proponowanych modyfikacji kształtowania połączeń, inne zaś potraktowano bardziej dokładnie, realizując badania doświadczalne i analizy numeryczne (połączenia klejowe) lub tylko analizy numeryczne (łączenie z zastosowaniem poprzecznego profilowania zamków). Część dotyczącą połączeń klejowych oraz połączeń z poprzecznym profilowaniem zamków uważam za wartościowy element rozprawy, zarówno z teoretycznego, jak i konstrukcyjnego punktu widzenia. O skuteczności współpracy płyt warstwowych w przenoszeniu oddziaływań decyduje szereg czynników odnoszących się do wytrzymałości, szczelności oraz trwałości połączeń płyt.

Rozdział 5: Podsumowanie i kierunki dalszych badań, o objętości 3 stron, przedstawia syntetyczne wnioski z badań zrealizowanych na potrzeby rozprawy, z potwierdzeniem słuszności tez sformułowanych na wstępie. W opinii recenzenta, zamierzony cel rozprawy został osiągnięty.

3. Ogólna ocena rozprawy

3.1. Tematyka

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy aktualnej tematyki współpracy poszycia ze stalową konstrukcją nośną. Badania związane z uwzględnieniem konstrukcyjnej roli poszycia z profilowanej blachy stalowej, w szczególności blachy fałdowej, są znacznie bardziej rozpoznane niż poszycia z płyt warstwowych. Zasady uwzględnienia współpracy blach fałdowych z konstrukcją nośną znalazły odzwierciedlenie, od lat 70. ubiegłego stulecia, w normach projektowania i wytycznych branżowych. Przy poszukiwaniu rozwiązań konstrukcyjnych poszycia z płyt warstwowych zwracano uwagę przede wszystkim na walory ekonomiczne oraz użytkowe (m. in. łatwość i szybkość montażu), a nie na rolę poszycia jako elementu konstrukcji nośnej. W związku z powyższym mniej badań poświęcono zagadnieniom nośności, odkształcalności oraz formom zniszczenia poszycia z płyt warstwowych, formułując szereg obaw przede wszystkim związanych z małą efektywnością płyt z uwagi na współpracę tarczową z konstrukcją nośną. Dostępne na rynku budowlanym wyroby oraz sposoby ich łączenia skutkowały małą doraźną nośnością połączeń oraz niebezpieczeństwem degradacji wytrzymałości i sztywności postępującej w czasie użytkowania obiektu. W okresie ostatnich dekad można zaobserwować zauważalny wzrost zainteresowania rolą konstrukcyjną poszycia z płyt warstwowych. Zagadnienia poruszone w rozprawie mieszczą się bez wątpienia w nurcie aktualnych zagadnień badawczych i są ważne z punktu widzenia nowoczesnego kształtowania rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych w budownictwie metalowym. Autor dokonał syntezy aktualnego stanu wiedzy w zakresie

tematyki objętej rozprawą, w tym numerycznych i analitycznych modeli obliczeniowych będących przedmiotem rozważań, uwzględniając literaturę naukowo-techniczną oraz normy i wytyczne projektowania. Przeprowadził obszerne badania doświadczalne, a wyniki badań doświadczalnych wykorzystał do oceny wiarygodności modeli numerycznych. Wyniki otrzymane z symulacji na modelach numerycznych porównano z wynikami uzyskanymi w badaniach na modelach fizycznych. Stwierdzono zadowalającą zgodność wyników z modeli numerycznych odtwarzających zachowanie się modeli fizycznych badanych doświadczalnie. Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań i analiz numerycznych, dotyczących istniejących rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych poszycia z płyt warstwowych, przedstawiono propozycję udoskonalenia tych rozwiązań i zaproponowano nowe rozwiązania. Sformułowano ponadto szereg zaleceń o charakterze ogólnym i wskazano kierunki dalszych badań.

3.2. Ocena wartości naukowej

Materiał zawarty w rozprawie jest obszerny i wartościowy, ale zdaniem recenzenta zakres badań ujętych w rozprawie dotyczy zbyt wielu zagadnień szczegółowych, z których niektóre musiały, z natury rzeczy, być potraktowane mniej wnikliwie. Autor nie dokonał przejrzystego wyboru kilku najważniejszych problemów związanych z konstrukcyjną rolą poszycia z płyt warstwowych, aby na tej podstawie przeprowadzić doświadczalny program badań dedykowany wybranym problemom, a następnie uzupełniony o budowę analitycznych i numerycznych modeli obliczeniowych. Weryfikacja i walidacja opracowanych modeli umożliwiłaby ocenę wiarygodności modelu do analiz parametrycznych. Analizy parametryczne umożliwiłyby z kolei uzyskanie informacji na temat wpływu różnych czynników, np. rodzaju i liczby łączników na rozkład sił i naprężeń w okładzinach i rdzeniu, które nie były szerzej badane na modelach fizycznych. Podejście polegające na badaniach doświadczalnych, które są przeprowadzone w węższym zakresie w celu walidacji modelu numerycznego, a następnie wykorzystanie zwalidowanego modelu numerycznego do szerszych analiz parametrycznych lub do tworzenia nowych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych jest obecnie przyjmowane jako standardowe podejście w badaniach naukowych.

Autor zaprojektował i przeprowadził badania doświadczalne, opracował w rozprawie numeryczne i analityczne modele obliczeniowe, dokonał porównania wyników badań doświadczalnych i numerycznych w wybranych punktach modeli. W dobrym stopniu opanował współczesne narzędzia i techniki badawcze, rozszerzył analizy o nowe elementy i wykazał, że przy ich pomocy można przedstawić propozycję nowych rozwiązań technicznych, poszerzających zakres uwzględnienia współpracy poszycia z płyt warstwowych w projektowaniu konstrukcji stalowych.

Podsumowując, problematyka naukowa została określona prawidłowo, obejmuje swym zakresem zagadnienia związane z badaniami doświadczalnymi, symulacjami numerycznymi oraz rozwiązaniami analitycznymi, w odniesieniu do nośności, sztywności tarczowej i przeciwskrętnej (w ograniczonym zakresie) oraz form zniszczenia płyt warstwowych. Przyjęte cele badawcze i tezy rozprawy zostały potwierdzone wynikami dociekań naukowych.

3.3. Ocena strony formalnej

Rozprawa nie budzi zastrzeżeń od strony użytego języka oraz terminologii naukowo-technicznej. Zauważone usterki nie obniżają w sposób istotny wartości merytorycznej rozprawy. Zdaniem recenzenta, każdy rozdział zawierający wyniki dociekań naukowych Autora powinien zakończyć się podsumowaniem i wnioskami z analiz i badań przedstawionych w rozdziałach. Jest to element rozprawy pozwalający recenzentowi na ocenę dojrzałości naukowej badacza.

4. Uwagi do rozprawy

4.1 Uwagi ogólne

a) Rozpatrywano nie tylko zagadnienia doraźnej nośności i sztywności poszycia z płyt warstwowych, ale odniesiono się również do zagadnień trwałości, które związane są z efektami zmienności oddziaływań w granicach nakreślonych przez realne kombinacje obciążeń. Sprecyzowano zakres zmienności oddziaływań na poszycie, a na tej podstawie maksymalną siłę działającą na pojedynczy łącznik mocujący płytę poszycia do konstrukcji nośnej. Przeprowadzono badania doświadczalne na próbkach połączenia płyty warstwowej stwierdzając, że w obrębie otworu nie występują odkształcenia trwałe blachy stanowiącej okładzinę płyty warstwowej. Ciekawym zadaniem badawczym byłoby zbudowanie modelu numerycznego i potwierdzenie tego faktu na podstawie wyników z symulacji numerycznych. Należy mieć na uwadze fakt, że wnioski wyciągnięte z badań doświadczalnych na próbce połączenia płyty warstwowej nie muszą być tożsame z wynikami badań zrealizowanych na fragmencie poszycia. Inny jest bowiem sposób przekazania obciążenia na łącznik w badaniach próbki poszycia z pojedynczym łącznikiem i w badaniach połączenia wielołącznikowego, który występuje w elemencie próbnym fragmentu poszycia.

b) Modele numeryczne elementów próbnych badanych doświadczalnie zbudowano w różnych programach komputerowych. Programy te uwzględniają różne założenia upraszczające i mają różne zastosowania, niektóre służą do analizy stateczności jako zadania wartości i wektorów własnych (liniowa stateczność), inne zaś do liniowych i geometrycznie nieliniowych zadań teorii sprężystości (w tym nieliniowej stateczności) i wreszcie inne do analiz zaawansowanych (nieliniowych geometrycznie i materiałowo, z uwzględnieniem kontaktu, tarcia, imperfekcji geometrycznych i materiałowych, a także inkluzji i form zniszczenia elementów wielowarstwowych, np. w postaci zgniecenia materiału rdzenia lub erwania materiału okładzin). Kandydat nie wyjaśnił w pracy dlaczego stosuje różne programy komputerowe do rozwiązania poszczególnych zagadnień cząstkowych, ani nie przeprowadza weryfikacji rozwiązań numerycznych na podstawie porównania wyników otrzymanych z różnych programów. Założenia do analizy i przesłanki dotyczące wyboru narzędzia do analizy numerycznej, w powiązaniu z wyjaśnieniem czy modele numeryczne są idealne czy też nieidealne, powinny być wyartykułowane w rozprawie.

4.2 Uwagi szczegółowe

W uwagach szczegółowych podano jedynie najważniejsze, zdaniem recenzenta, usterki tekstu, zarówno redakcyjne jak i o charakterze merytorycznym.

Str. 10, w. 6 od góry

Zdanie rozpoczynające się od słów „Główny nacisk położono na siły związane ze stabilizacją ...” jest nielogiczne. Sama siła jest naciskiem. Nacisk można położyć na zagadnienia związane z obliczaniem sił związanych ze stabilizacją!

Str. 10, w. 6-9 od góry, a także w dalszej części rozprawy

Autor stwierdza, że siły związane ze stabilizacją dotyczą współpracy poszycia z konstrukcją wsporczą, która to współpraca może odnosić się również do sił pochodzących od obciążeń zewnętrznych. Jest to mało precyzyjne określenie. W zagadnieniach początkowej stateczności konstrukcji idealnych (LBA), tylko zintegrowana sztywność początkowa, poszycia i połączenia, ma wpływ na utratę stateczności sprężystej. W zagadnieniach nieliniowej teorii stateczności konstrukcji sprężysto-plastycznych (NBA), sztywność i nośność samego poszycia oraz sztywność i nośność połączenia (a niekiedy również zdolność do odkształcenia) mają wpływ na stan graniczny ustroju nośnego traktowanego łącznie jako poszycie, elementy konstrukcji wsporczej oraz połączenia istniejące między nimi. Siły współdziałania między poszyciem i konstrukcją wsporczą zależą od charakterystyk wytrzymałościowych oraz sztywnościowych elementów składowych.

Str. 11, w. 11 od dołu

Przegrody wewnętrzne są to elementy konstrukcyjne pełniące rolę tarczy ściennej lub płyty stropowej, przy czym przegrody te znajdują się wewnątrz budynku. Poszycie ścian zewnętrznych lub poszycie dachu dotyczy obudowy budynku, a więc należałoby mówić raczej o przegrodzie osłonowej budynku, a nie zewnętrznej.

Str. 12-20, podrozdział 2.1

Prace badawcze związane ze współpracą tarcz poszycia z blach trapezowych z konstrukcją wsporczą hal stalowych rozpoczęły się w kraju w latach 70. ubiegłego stulecia w COBPKM Mostostal oraz w Politechnice Warszawskiej, we współpracy z Wojskową Akademią Techniczną w Warszawie. W następnych latach prace były kontynuowane w szerszym zakresie, m.in. przekryć zakrzywionych. Jedną z ostatnich prac doktorskich z tego obszaru była rozprawa mgr inż. Marcina Gryniwicza pt. *Metoda modelowania konstrukcji hal stalowych obudowanych blachą trapezową*, obroniona w Politechnice Białostockiej w 2018 roku.

Str. 42-43, rys. 3.6 i rys. 3.7

Przedstawiono wyniki odnoszące się do belki swobodnie podpartej oraz belki ciągłej. Nie podano żadnych założeń odnoszących się do schematu belki ciągłej. Rodzą się pytania: a) ile przęseł ma analizowana belka ciągła, b) czy rozważano stateczność belki przy założeniu ciągłości deformacji w miejscu podpór, c) jak przyjmowano warunki odnoszące się do

przemieszczeń bocznych i obrotów w płaszczyźnie mniejszej bezwładności przekroju, a także kąta skręcenia i deplanacji pasów nad podporami wewnętrznymi, d) czy rozważania ograniczono jedynie do analizy stateczności wydzielonego przęsła belki ciągłej (skrajnego lub przedskrajnego, jak pokazano na rys. 3.10), e) jakie warunki brzegowe realizowano w miejscach wydzielonych przęseł, itd.

Str. 44-45, opis programu LTBeam

Równanie (3.1) opisuje problem początkowej stateczności sprężystej, gdzie \mathbf{K}_L jest macierzą początkowej sztywności sprężystej, \mathbf{K}_G - macierzą początkowych sił przekrojowych stanu przedkrytycznego (momentów odpowiadających zginaniu belki w płaszczyźnie większej bezwładności przekroju), μ_{cr} zaś mnożnikiem obciążenia. Programy komputerowe wykorzystują standardowe procedury matematyczne rozwiązywania liniowego problemu wartości własnych i wektorów własnych (LEA). W zależności od zadeklarowanej liczby n wartości własnych, użytkownik otrzymuje $i=1,2,\dots,n$ pierwszych wartości własnych (począwszy od najmniejszej wartości mnożnika $\mu_1 = \mu_{cr}$) i odpowiadających im wektorów własnych (skupiających parametry funkcji kształtu, opisujących kolejne postacie utraty stateczności). Czy podany na str. 44 sposób wyznaczania najniższej wartości własnej metodą bisekcji jest stosowany w programie LTBeam? Czy program LTBeam ogranicza się tylko do obliczenia mnożnika obciążenia krytycznego i odpowiadającej mu postaci utraty stateczności? Jak wyznaczane są kolejne wartości własne? Jaka jest gwarancja, że nie pominie się którejs z kolejnych wartości własnych w metodzie bisekcji?

Str. 45, rys. 3.9 i stosowane oznaczenia

Skręcenie przekroju jest to kąt obrotu o wektorze skierowanym wzdłuż osi belki $\theta=\theta_x$, pochodna v' jest w teorii małych obrotów kątem obrotu θ_z , pochodna skręcenia $\theta'=\theta_x'$ jest natomiast spaczeniem. Na rys. 3.9 podano sztywności dwuparametrowego ośrodka sprężystego, usztywnienia ciągłego przeciwskrętnego R_θ i bocznego R_v , które rozważa się w pracy. Rys. 3.9 sugeruje, że warunki sprężystego podparcia belki na końcach sformułowano jako R_v . Czy oznaczenie R_v dotyczy końca belki, czy każdego przekroju na długości belki? Warunki brzegowe dotyczące stanu krytycznego wymagają podania pozostałych składowych stanu deformacji. Czy myślowo przyjęto, że zawsze na końcach belki i w miejscu podpór belki wieloprzęsłowej $R_v=R_\theta=0$? Jakie warunki brzegowe dotyczą sztywności spaczenia, czy $R_\theta=0$ (brak deplanacji pasów), czy też $R_\theta=\infty$ (deplanacja pasów swobodna)?

Str. 46, w. 4 pod opisem do rys. 3.10

Określenie „w postaci podpory ciągłej” sugeruje, że chodzi o sztywne podparcie, eliminujące możliwość przemieszczenia bocznego belki. Logicznieszym wydaje się określenie „w postaci ciągłego podparcia sprężystego”, gdyż niżej wyznacza się sztywność podparcia. Brakuje wyjaśnienia, że rozważania dotyczą podparcia o stałej sztywności s_v na długości belki (duże litery, w tym wypadku S_v , lepiej zarezerwować do opisu sztywności podparcia dyskretnego). Mało logiczne jest określenie, że podparcie „zapobiega podłużnemu obrotowi elementu (kierunek v' ...”? Na rys. 3.9 nie ma podanego kierunku v' ? Wyjaśnienie należałoby odnieść do kąta obrotu θ_z (wokół osi z).

Str. 47 i 49, tabl. 3.3 i 3.4

Tablice dotyczą oceny nośności przy zwichrzeniu belek, swobodnie podpartych w płaszczyźnie zginania i wykonanych z kształtownika walcowanego IPE o różnej wysokości. Odniesiono się do 2 przypadków: 1) bez usztywnienia, 2) z bocznym usztywnieniem ciągłym, modelującym postaciową sztywność poszycia s_v (w pracy oznaczono S_v). W wypadku braku uwzględnienia współpracy belki z poszyciem, nośność belki o przekroju bisymetrycznym, powinna być taka sama, jeżeli obciążenie przyłożone jest do osi belki. W założeniach do analizy należałoby więc dodać, że:

- punkt przyłożenia obciążenia przyjęto taki sam w 1) i 2), tzn. w miejscu mocowania poszycia do belki, niezależnie czy uwzględnia się współpracę poszycia z belką, czy też nie,
- wyjaśnienie dotyczące sposobu wyznaczenia eurokodowego współczynnika redukcyjnego χ_{LT} , tzn. czy stosuje się podejście ogólne, zgodnie z PN-EN 1993-1-1/ 6.3.2.2, czy też szczególne, odnoszące się do kształtowników walcowanych i ich odpowiedników spawanych, zgodnie z PN-EN 1993-1-1/ 6.3.2.3.

We wnioskach natomiast należałoby dodać komentarz odnoszący się skuteczności stabilizującej roli poszycia w wypadku oddziaływania o kierunku zgodnym z grawitacją i o kierunku przeciwnym.

Str. 48 i 50, rys. 3.11 i 3.12

Analizy dotyczące belki ciągłej wymagają precyzyjnego opisu. Z podpisów pod rysunkami wynika, że analiza belki ciągłej nie dotyczy modelu belki wieloprzęsłowej, lecz wydzielonych przęseł belki ciągłej, skrajnego oraz przedskrajnego (w pracy stosuje się termin *przyskrajne*) z ciągłym podparciem sprężystym o stałej na długości sztywności postaciowej równej 972 kNm. Jeżeli rozważano wydzielone przęsła, ale z przebiegiem momentu odpowiadającym belce ciągłej, to jakie warunki brzegowe zakładano w wydzielonym przęsle w miejscu przerwania ciągłości belki? Jakie proporcje momentów podporowych i przęsłowych przyjęto w odniesieniu do wydzielonych przęseł (proporcje zależą od liczby przęseł belki wieloprzęsłowej)? W sytuacji braku precyzyjnego opisu założeń przyjmowanych do analizy, czytelnik zaczyna mieć wątpliwości odnoszące się do poprawności obliczeń i wyciągniętych wniosków.

Str. 55, w. 3-4 pod tabl. 3.8

Wniosek „rzeczywista skuteczność podpory przeciwskrętnej jest w znacznie większym stopniu uzależniona od jakości robót wykonawczych niż podpory związanej ze sztywnością postaciową” nie wynika z obliczeń i danych zamieszczonych w tabl. 3.8, ma więc charakter subiektywnej oceny, a nie wniosku naukowego popartego badaniami zrealizowanymi na potrzeby rozprawy. Należało podać np. następujące wnioski, że: 1) skuteczność poszycia jako czynnika zapewniającego wyższą nośność z uwagi na zwichrzenie jest tym większa im większa jest jego sztywność postaciowa, 2) w rozważaniach przedstawionych w dalszej części rozprawy skupiono się więc na zagadnieniach wyznaczania sztywności postaciowej zintegrowanego ustroju złożonego z typowej tarczy poszycia oraz jej połączenia z płytwią

oraz przedstawienia propozycji nowych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych, zmierzających do podwyższenia skuteczności poszycia w zapewnieniu stateczności konstrukcji wsporczej.

Str. 56 i 57, rys. 3.13 i 3.14

W standardowym sposobie łączenia płyt warstwowych, najslabszym ogniwem decydującym o sztywności postaciowej i nośności ustroju złożonego z poszycia i jego połączenia z płatwią jest mała liczba łączników mechanicznych i niskie parametry wytrzymałościowo-sztywnościowe łącznika. Typowy ustrój złożony z płatwi oraz poszycia z połączeniami płyt warstwowych pokazano na rys. 3.13, a jego uproszczony, „powłokowo-belkowy” model numeryczny przedstawiono na rys. 3.14. Model przedstawiony na rys. 3.14 uwzględnia jedynie charakterystyki płatwi oraz jej połączenia z poszyciem, pomija zaś sztywność postaciową płyty warstwowej. Ponieważ opis budowy modelu obliczeniowego jest zbyt lakoniczny, rodzą się następujące wątpliwości:

- a) Czy oba pasy umownej kratownicy są elementami o tej samej sztywności (rys. 3.14 sugeruje, że pas zastępczy, łączący węzły prętów wykratowania jest elementem o znacznie mniejszej sztywności)?
- b) Jak wyglądała pierwsza forma utraty stateczności? Czy model imperfekcyjny ujmował wstępną deformację ustroju, czy tylko płatwi?

Str. 63, tabl. 3.10

Wyniki ujęte w tabelicy 3.10, uwzględniają sztywność postaciową poszycia oraz sztywność i nośność połączenia. Czy model numeryczny płatwi przedstawiony na rys. 3.14 ma również zastosowanie w tym wypadku? W jaki sposób uwzględniono w modelu numerycznym przedstawionym na rys. 3.14 sztywność poszycia?

Str. 102, wzór (3.16)

We wzorze powinna występować zmienna a_p , zamiast a .

Str. 108, podrozdział 3.4

W analizach GMNA dotyczących fragmentu poszycia badanego doświadczalnie przyjęto model numeryczny odtwarzający w sposób możliwie najdokładniejszy geometrię konstrukcji. W opisie brakuje informacji o modelach konstytutywnych materiałów, a także o stosowanych modelach kontaktu i tarcia.

Str. 125, podrozdział 4.1

W tytule podrozdziału powinna być liczba łączników, zamiast ilość łączników.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgra inż. Marcina Górskiego pt. *Współpraca poszycia z płyt warstwowych ze stalową konstrukcją nośną*, która powstała w Politechnice Rzeszowskiej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Aleksandra Kozłowskiego, stwierdzam, że w pracy tej Autor przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazując się:

- a) Ogólną wiedzą teoretyczną i praktyczną z zakresu oceny różnych czynników wpływających na efektywność współpracy poszycia z blach warstwowych ze stalową konstrukcją nośną, w tym stanów granicznych nośności i odkształcalności, ocenianych na podstawie badań doświadczalnych.
- b) Wiedzą praktyczną z zakresu komputerowego modelowania i zaawansowanej analizy GMNA/GMNIA w zastosowaniu do deterministycznej oceny stopnia współpracy poszycia w postaci płyt warstwowych ze stalową konstrukcją nośną,
- c) Wiedzą w zakresie wnioskowania o sztywności i nośności doraźnej, z elementami oceny wpływu obciążeń zmiennych w czasie na degradację właściwości połączeń.

Przedstawiony w rozprawie problem naukowy mieści się w nurcie aktualnej tematyki w odniesieniu do konstrukcji stalowych, ma walory innowacyjnych analiz i badań o charakterze teoretycznym i aplikacyjnym. Autor rozpoznał aktualny stan wiedzy w tematyce objętej rozprawą, sformułował szczegółowe problemy badawcze oraz wykazał się umiejętnością prowadzenia badań w zakresie odpowiednim do nakreślonego celu i sformułowanych tez rozprawy, a także w zakresie zastosowanej metodologii badań i sposobu wnioskowania. Zauważone usterki rozprawy nie mają istotnego znaczenia jeżeli chodzi o wartość merytoryczną rozprawy.

Przedstawiona wyżej pozytywna ocena rozprawy oznacza, że praca 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). W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

