

Prof. dr hab. inż. Antoni Biegus, em. prof. PWr

Politechnika Wroclawska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
☎ 664 531 931
e-mail: antoni.biegus@pwr.wroc.pl

Wrocław, 17.06.2019

WPŁYNEŁO DNIA

25 -06- 2019

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Piątkowskiego pt.
Analiza nośności dźwigarów kratowych z imperfekcjami geometrycznymi

1. Wprowadzenie

Rozprawa doktorska mgra inż. Michała Piątkowskiego pt. *Analiza nośności dźwigarów kratowych z imperfekcjami geometrycznymi* została wykonana na Wydziale Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej. Jej promotorem jest dr hab. inż. Joanna Jankowska-Sandberg, prof. PK. Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na mocy uchwały Rady Wydziału Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej na posiedzeniu w dniu 23.04.2019.

W rozprawie doktorskiej analizowano zagadnienia nośności kratownic dachowych z wstępnymi wygięciami pasów w płaszczyźnie połaci oraz ich oddziaływań imperfekcyjnych przekazywanych na połaciowe stężenia poprzeczne. Wykonano badania doświadczalne, numeryczne i analityczne ww. problematyki. Treść rozprawy doktorskiej przedstawiono na 141 stronach i podzielono na 7 rozdziałów

1. Wstęp
2. Przedmiot, cel i zakres oraz tezy rozprawy
3. Omówienie aktualnego stanu wiedzy
4. Analizy wstępne dźwigarów kratowych z imperfekcjami
5. Badania doświadczalne
6. Analizy numeryczne
7. Podsumowanie i wnioski

bibliografię oraz streszczenia. Ponadto rozprawa zawiera 11 załączników (na CD).

2. Ocena rozprawy doktorskiej

2.1. Ocena tematu rozprawy doktorskiej

W celu usztywnienia płaskich dźwigarów dachowych w płaszczyźnie połaci dachu stosuje się połaciowe stężenia poprzeczne. Zasady ich stosowania ustalono na podstawie długoletniego doświadczenia. Teoretyczny model ich obliczania opracowano dopiero w ostatnim dwudziestoleciu XX w. Przyjęto analityczny model „imperfekt” losowo wstępnie wygiętego (o strzałce e_0) pręta, tj. stężanego w płaszczyźnie połaci dachu pasa górnego dźwigara dachowego. Działanie siły normalnej w tym wygiętym pręcie generuje oddziaływanie imperfekcyjne, które jest przekazywane na stężenie. Według PN-EN 1993-1-1¹ skutki wygięć stężanego pasa górnego dźwigara dachowego na wyłączenie połaciowego stężania poprzecznego oblicza się zastępując je

¹ PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

równoważnym oddziaływaniem imperfekcyjnym, tj. równomiernie rozłożonym obciążeniem przeszłowym $q_{d,EC}(x) = \text{const}$ oraz reakcjami podporowymi $R_{d,EC}$.

W obliczeniowym modelu „imperfekt” oceny wyężenia połączeniowych stężeń poprzecznych rekomendowanym w ¹ przyjęto następujące założenia:

1. Usztywniany pas górny dźwigara dachowego i stężenie traktuje się jak wyizolowane z konstrukcji odpowiednio pręt i kratownicę (połączone ze sobą płatwiami).
2. Losowe wstępne wygięcie (w płaszczyźnie połąci dachu) o strzałce e_0 stężanego pasa górnego dźwigara dachowego ma kształt paraboli.
3. Stężany element jest wyężony stałą na długości siłą ściskającą $N_1(x) = \text{const}$.
4. Nie uwzględnia się w analizie skręcenia płaszczyzny głównej dźwigara o kat ϕ_0 w wyniku wstępnego wygięcia jego stężanego pasa górnego o strzałce e_0 .

Model ten nie jest poprawny, gdyż rozkład siły osiowej w stężanym pasie dźwigara dachowego jest wzdłużnie zmienny parabolicznie oraz może być wzdłużnie znakozmienny (tj. na jego długości występuje zarówno ściskanie, jak i rozciąganie). Stąd nie jest spełnione założenie 3. Ponadto w wyniku wygięcia stężanego pasa górnego występuje skręcenie o kat ϕ_0 płaszczyzny głównej dźwigara dachowego. Sprawia to, że założenie 4 też nie odpowiada modelowi fizycznemu analizowanej konstrukcji.

W 2014 roku prof. dr hab. inż. Szymon Pałkowski i Autor ocenianej rozprawy doktorskiej w ² jako pierwsi wskazali na niepoprawność przyjętego w ¹ modelu obliczenia połączeniowych stężeń poprzecznych. Stosując metodę równowagi sił w węzłach ustroju, uwzględniając rzeczywisty rozkład sił ściskających w stężanym, wygiętym parabolicznie (o ostrzałce e_0) pasie oraz skręcenie płaszczyzny głównej kratownicy dachowej, wykazali w ², że na połączeniowe stężenie poprzeczne przekazywane jest oddziaływanie imperfekcyjne odmienne zarówno jakościowo, jak i ilościowo od obliczonego wg ¹. Skutkiem tego są istotne różnice w ocenie bezpieczeństwa płatwi i połączeniowego stężenia poprzecznego, gdyż obliczenia wg ¹ prowadzą do zaniżenia ich wyężenia.

Od 2015 roku w Politechnice Wrocławskiej są prowadzone badania identyfikacji oddziaływań imperfekcyjnych stężanych dźwigarów dachowych i uściślenia ich modeli obliczeniowych. Wyniki tych badań analitycznych i numerycznych, oprócz prac które są cytowane w rozprawie doktorskiej, przedstawiono m.in. w artykułach ^{3, 4, 5} oraz w referatach na konferencjach „Krynica 2017” i „Krynica 2018” ^{6, 7}. Przedstawiono w nich nowy, uogólniony, analityczny model obliczenia oddziaływań imperfekcyjnych stężanych, wstępnie wygiętych parabolicznie (o ostrzałce e_0) elementów, wyę-

² Pałkowski Szymon, Piątkowski Michał: *O obliczaniu poprzecznych stężeń dachowych*. Inżynieria i Budownictwo nr 4/2014, s. 210-213.

³ Czepizak Dariusz, Biegus Antoni, *Refined calculation of lateral bracing systems due to global geometrical imperfections*. Journal of Constructional Steel Research. 2016, vol. 119, s. 30-38.

⁴ Biegus Antoni, Czepizak Dariusz: *Equivalent stabilizing force of the simply supported roof girders including the longitudinal variability of the compression force acting in the restrained chord*. Civil and Environmental Engineering Reports. 2017, vol. 25, nr 2, p. 43-57.

⁵ Biegus Antoni, Czepizak Dariusz: *Generalized model of imperfection forces for design of transverse roof bracings and purlins*. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018, vol. 18, nr 1, p. 267-279.

⁶ Biegus Antoni, Czepizak Dariusz: *Analytical and numerical research of equivalent stabilizing force of stiffened truss chords*. 64 Scientific Conference of the Committee for Civil Engineering of the Polish Academy of Sciences and the Science Committee of the Polish Association of Civil Engineers, Krynica Zdrój, Poland, September 16-20, 2018; EDP Sciences, 2019. art. 09003, p.1-8. (MATEC Web of Conferences, ISSN 2261-236X; vol. 262).

⁷ Biegus Antoni, Czepizak Dariusz: *Equivalent stabilizing force of members parabolically compressed by longitudinally variable axial force*. 64 Scientific Conference of the Committee for Civil Engineering of the Polish Academy of Sciences and the Science Committee of the Polish Association of Civil Engineers, Krynica Zdrój, Poland, September 16-20, 2018; EDP Sciences, 2019. art. 09004, p. 1-8. (MATEC Web of Conferences, ISSN 2261-236X; vol. 262).

zonych wzdłużnie zmienną siłą osiową (zarówno ściskającą, jak i rozciągającą), który uwzględnia skręcenie o kąt ϕ_0 płaszczyzny głównej dźwigara. Umożliwia on wyznaczanie oddziaływań imperfekcyjnych stężanych pasów dźwigarów dachowych jedno oraz wieloprzęsłowych, które są połączone ze słupami przegubowo, podatnie lub w sposób sztywny. Oddziaływania imperfekcyjne wyznaczone wg tego modelu skonfrontowano z rezultatami obliczeń metodą równowagi sił w węzłach i z wynikami analiz numerycznych modeli 3D konstrukcji rzeczywistych (uwzględniających ich geometryczną nieliniowość). Wykonano analizy parametryczne modeli konstrukcji o zmiennych schematach statycznych i parametrach geometryczno-szywnościowych, a także podano pogłębioną dyskusję zagadnienia.

Dotychczasowe prace badawcze przedstawione m.in. w ²⁻⁷ wykazały, że analizowane oddziaływania imperfekcyjne wyznaczone wg ¹ dają niepoprawne ich oszacowania. Na obecnym etapie badań problematyka analizowana w rozprawie doktorskiej jest tylko częściowo rozpoznana. Podjęty temat badawczy jest aktualny, ważny, wielowątkowy i celowy zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Stąd tematykę rozprawy doktorskiej należy uznać za dysertabilną.

2.2. Osiągnięcia rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska poświęcona jest zagadnieniu oceny oddziaływań imperfekcyjnych generowanych przez wstępnie wygięte w płaszczyźnie połączenia dachu, stężane pasy górne kratownic, a także nośności wyboyczeniowej pasów górnych takich dźwigarów z imperfekcjami geometrycznymi pasów. Przedstawiono w niej badania doświadczalne, numeryczne oraz analityczne w odniesieniu do jednoprzęsłowych kratownic dachowych podpartych obustronnie przegubowo. Ich zasadniczym celem była próba identyfikacji i weryfikacja modeli obliczeniowych oszacowania oddziaływań imperfekcyjnych połączeniowych stężeń poprzecznych zaproponowanych m.in. w ². Lektura rozprawy doktorskiej wykazuje, że Autor ma dobre rozeznanie badanej tematyki.

Rozdział 1 (*Wstęp*) oraz rozdział 2 (*Przedmiot, cel i zakres oraz tezy rozprawy*) poświęcono prezentacji analizowanej w rozprawie tematyki badawczej.

W rozdziale 3 przedstawiono stan wiedzy związanej z tematem rozprawy, analizując polskie i zagraniczne publikacje, a także normy.

W rozdziale 4 omówiono wstępne analizy teoretyczne wyężenia kratownic dachowych z imperfekcjami geometrycznymi stężanych pasów i ich oddziaływań na połączeniowe stężenie poprzeczne. Wyprowadzono wzór na imperfekcyjne przęsłowe obciążenie $q_{d,\sin}(x)$ elementu swobodnie podpartego, z wstępnym sinusoidalnym wygięciem (o ostrzałce e_0), obciążonego parabolicznie zmienną wzdłużnie siłą osiową. Oddziaływanie imperfekcyjne elementu o wygięciu sinusoidalnym $q_{d,\sin}(x)$ porównano z generowanym w przypadku przyjęcia wygięcia parabolicznego $q_{d,\text{parabol}}(x)$ wg ^{2,4}.

Ważnym wkładem Autora w rozwój wiedzy dotyczącej analizowanego zagadnienia są wyniki badań eksperymentalnych przedstawione w rozdziale 5. Wykonano badania doświadczalne nośności oraz oddziaływań imperfekcyjnych 10. modeli kratownic (w skali półtechnicznej), a także parametrów geometrycznych kształtowników i wytrzymałościowych stali, z której je wykonano. Kratownice o rozpiętości 7 m wykonano z rur kwadratowych, o węzłach spawanych. Przyłożone do pasa górnego grawitacyjne obciążenie kratownicy, realizowano poprzez odpowiedni system wieszaków.

Wykonanie eksperymentów wymagało m.in. opracowania oraz zastosowania autorskich rozwiązań konstrukcyjnych modeli i oprzyrządowania stanowiska badawczego, a także wykonania testów pomocniczych sprawdzających poprawność badań.

Należy wysoko ocenić oraz docenić staranność realizacji wykonanych eksperymentów, w których zrealizowano badania:

- a) oddziaływań imperfekcyjnych generowanych przez wygięte w płaszczyźnie połączenia dachu stężane pasy górne kratownic; obciążenia te są przekazywane na połączeniowe stężenie poprzeczne,
- b) nośności granicznej kratownicy z imperfekcjami geometrycznymi pasów (górných i dolnych) z warunku stateczności pasów górnych.

ad a) Oddziaływania na podpory boczne kratownicy mierzono czujnikami siły zainstalowanymi w wybranych węzłach jej pasa górnego i dolnego. Imperfekcję geometryczną pasa górnego wywoływano wymuszając przemieszczenia podpór górnych kratownicy. Otrzymane rezultaty badań uśredniono i porównano z wynikami analizy teoretycznej określonymi wg ¹ oraz wg ⁴.

Badania doświadczalne potwierdziły wzdłużnie zmienny i znakozmienny rozkład oddziaływań imperfekcyjnych, który otrzymano z rozwiązań teoretycznych metodą równowagi sił w węzłach wg ², jak i z rozwiązań analitycznych wg ⁴. Ponadto ich węzłowe wartości (tj. siły w płatwiach) mogą być zdecydowanie większe od obliczonych wg ¹. Wykazano więc eksperymentalnie, że model obliczeniowy oddziaływań imperfekcyjnych wg ¹ (o równomiernym rozkładzie obciążeń przeszłowych) jest niepoprawny i może prowadzić do niebezpiecznej oceny zaniżającej wyężenie płatwi oraz połączeniowego stężenia poprzecznego.

Rezultaty eksperymentalne są podobne jakościowo do wyników oszacowań teoretycznych. Ilościowe ich różnice zaś, wynikają z niedoskonałości zarówno eksperymentów, jak i przede wszystkim z uproszczających założeń prętowych modeli zastosowanych w oszacowaniach wg ² oraz wg ⁴.

ad b) Stosując wstępne obciążenie poziome wywoływano wybrane konfiguracje globalnych i lokalnych imperfekcji geometrycznych pasów kratownic. Następnie kratownice obciążano siłami pionowymi P . Ścieżkę równowagi statycznej pasa ściskanego kratownicy wyznaczono na podstawie pomierzonych poziomych przemieszczeń jej wybranych węzłów δ . Otrzymane wyniki $P(\delta)$, osobno dla każdego badanego modelu i każdej konfiguracji wstępnych wyięć pasów kratownicy posłużyły do określenia metodą *Southwella* obciążenia krytycznego pasów górnych. Badania te nie wiążą się bezpośrednio z podstawową tematyką rozprawy. Potwierdziły one m.in. wpływ imperfekcji geometrycznych pasa dolnego kratownicy na nośność wyboczeniową pasa górnego, a także złożoność problematyki stateczności kratownic.

Rozdział 6 rozprawy doktorskiej poświęcono omówieniu analiz numerycznych badanych zagadnień. Korzystając z programu *SOFISTIC* wykonano analizę numeryczną kratownic badanych eksperymentalnie. Wykazała ona m.in. istotny wpływ sposobu podparcia pasa dolnego, a także jego sprężystej deformacji na wartości węzłowych oddziaływań imperfekcyjnych przekazywanych na połączeniowe stężenie poprzeczne. Ponadto potwierdziła wnioski z analiz przedstawionych w ⁶, o konieczności uwzględnienia ww. deformacji w ocenie oddziaływań imperfekcyjnych wyznaczanych wg prętowych modeli obliczeniowych w ² oraz w ⁴.

W celu identyfikacji wpływu rozwiązań konstrukcyjnych dachów kratownicowych na oddziaływania imperfekcyjne wykonano parametryczne analizy numeryczne. Ich zmiennymi były: geometria kratownicy (topologia prętów, wysokość i kąt nachylenia

połaci), schemat statyczny kratownicy i jej obciążenia, schemat bocznego podparcia pasów i ich sztywność oraz konfiguracja imperfekcji geometrycznych pasów. Wykazały one, że istotny wpływ na wyiężenie płatwi i połączeniowego stężenia poprzecznego ma kąt nachylenia połaci dachu i konfiguracja imperfekcji geometrycznych stężanego pasa kratownicy. Pozostałe rozpatrywane parametry nie mają wpływu na ww. wyiężenie, gdyż wynikają z odmiennych wartości siły osiowej stężanego pasa kratownicy.

W podsumowaniu oceny należy stwierdzić, że wyniki badań przedstawione w rozprawie doktorskiej mgr. inż. Michała Piątkowskiego stanowią oryginalne rozwiązania problemu naukowego. Autor wykonał liczne, wartościowe i starannie wykonane badania doświadczalne i parametryczne symulacje numeryczne oddziaływań imperfekcyjnych kratownic z wyiężeniami w płaszczyźnie połaci dachu stężanymi pasami górnymi. Cennymi elementami naukowymi i poznawczymi rozprawy doktorskiej są:

- eksperymentalna identyfikacja rozkładów oddziaływań imperfekcyjnych kratownic z wyiężeniami ich stężanych pasów górnych,
- doświadczalne potwierdzenie wzdluznej zmienności i znakozmienności rozkładu oddziaływań imperfekcyjnych, który wynika z rozwiązań analitycznych wg ² i wg ⁵, a także analiz numerycznych,
- eksperymentalne wykazanie, że równomierny rozkład oddziaływań imperfekcyjnych wyznaczony wg rekomendacji normowej ¹ jest niepoprawny,
- doświadczalna ocena wpływu imperfekcji geometrycznych pasów (górných i dolnych) z płaszczyzny kratownicy na nośność wybozeniową jej pasa górnego,
- wykonanie licznych parametrycznych analiz numerycznych oddziaływań imperfekcyjnych, które poszerzają wiedzę w badanym temacie.

2.3. Uwagi dyskusyjne i usterki rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy doktorskiej „*Analiza nośności dźwigarów kratowych z imperfekcjami geometrycznymi*” nie odpowiada jej treści. Jej tematyka dotyczy przede wszystkim identyfikacji oddziaływań imperfekcyjnych kratownic dachowych, a nie ich nośności.

Teza 1 jest nieściła. Zamiast „ściskanego” należało użyć „stężanego”, gdyż pręty rozciągane generują identyczne oddziaływania imperfekcyjne jak pręty ściskane ⁵.

W omówieniu stanu wiedzy podano zbyt wiele powszechnie znanych informacji dotyczących stateczności konstrukcji, które nie są bezpośrednio związane z tematem rozprawy doktorskiej. Zabrakło w nim natomiast pełnego omówienia wyników analitycznych badań identyfikacyjnych oddziaływań imperfekcyjnych wykonanych w Politechnice Wrocławskiej przedstawionych m.in. publikacjach w ³⁻⁷. Analiza stanu wiedzy powinna w swych konkluzjach wytypować „nierozpoznane” zadania naukowe, które będą rozważane. W rozprawie doktorskiej brak jest takiego podsumowania tego rozdziału.

Podstawową kwestią w ocenie nośności ściskanego pręta *imperfekt* jest przyjęcie kształtu wyiężenia jego osi. Wykonana analiza oddziaływań imperfekcyjnych elementu z wyiężeniem sinusoidalnym ma tylko charakter poznawczy. Jak udowodniono w ^{8, 9}, w bezpiecznej ocenie nośności pręta (niezależnie od jego schematu statycznego) należy przyjmować wyiężenie w kształcie paraboli II stopnia.

⁸ Goncalves R., Camotim D.: *On the incorporation of equivalent member imperfection In the In-plane design of steel frames*. Journal of Constructional Steel Research, vol. 61 (2005), p.1226-1240.

⁹ Biegus A., Wojcyszyn D.: *Studies on buckling lengths of chords for out-of-plane instability*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. XI, no 3, 2011.

W tab. 5.7 i 6.1 wyniki eksperymentalnie oraz numerycznie wyznaczonych oddziaływań imperfekcyjnych porównano z oszacowanymi analitycznie m.in. wg ¹ i wg ⁴, które obliczono niepoprawnie. Zagadnienia nieprawidłowości tych obliczeń były wyjaśniane e-mailowo oraz w rozmowach telefonicznych z Autorem rozprawy doktorskiej.

W przypadku obliczeń wg ¹ siła normalna w płatwi okapowej wynosi 0,42 kN, a nie 0,06 kN, jak podano w tab. 5.7 i 6.1.

W nieprawidłowo wykonanych w tab. 5.7 i 6.1 obliczeniach oddziaływań imperfekcyjnych wg ⁴ przyjęto, iż w pręcie przypodporowym stężanego pasa siła normalna jest równa zero. Siła normalna w tym pręcie wynosi $N_{supp} = 4,74$ kN, ekstremalna zaś w środku rozpiętości kratownicy wynosi $N_{max} = 20,99$ kN. W omawianych obliczeniach należało skorzystać z rozwiązania podanego w ⁴ i przyjąć wartość współczynnika podporowej siły normalnej $\alpha = 4,74/20,99 = 0,226$. W tab. 5.7 i 6.1 w ocenie sił imperfekcyjnych w płatwiach przyjęto wartość współczynnika $\alpha = 0$, co sprawia, że siły te obliczone są niepoprawnie.

Oddziaływania imperfekcyjne są samozrównoważone, tj. reakcje podporowe R i przęsłowe obciążenie q stężanego pręta dają wypadkową równą zero. Tego warunku nie spełniają siły węzłowe podane w tab. 5.7 i 6.1. Należy wyjaśnić tę kwestię.

Słabym elementem rozprawy doktorskiej jest wnioskowanie z wykonanych badań doświadczalnych i teoretycznych, a także brak pogłębionej dyskusji ich rezultatów wyjaśniających m.in. fizykę badanych zjawisk oraz przyczyny rozbieżności wyników.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Piątkowskiego jest starannie zredagowana. Szczególnie wysoko należy ocenić jej część graficzną, gdyż dobrze opracowane rysunki stanowią istotne uzupełnienie części tekstowej rozprawy. Zauważone usterki redakcyjne i językowe przekazałem bezpośrednio Doktorantowi.

3. Wniosek końcowy

Mgr inż. Michał Piątkowski w rozprawie doktorskiej pt. *Analiza nośności dźwigarów kratowych z imperfekcjami geometrycznymi* podjął się badania zagadnień wyjątkowo złożonych i trudnych. Tematykę rozprawy doktorskiej należy uznać za dysertabilną.

Autor wykazał się wiedzą, dobrym rozpoznaniem tematyki stateczności, umiejętnościami realizacji złożonych badań doświadczalnych, a także wykonania zaawansowanych badań numerycznych konstrukcji stalowych.

Stwierdzam, iż koncepcja rozprawy doktorskiej, wykonane badania eksperymentalne i numeryczne są oryginalne. Stanowią one ważki przyczynki do uściślenia modeli oceny oddziaływań imperfekcyjnych płatwi i połączeniowych stężeń poprzecznych oraz optymalnego i bezpiecznego ich projektowania. Ponadto wnoszą istotny wkład w rozwój teorii konstrukcji metalowych.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne (przedstawione w pkt. 2.3) nie umniejszają pozytywnej oceny końcowej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Piątkowskiego.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Piątkowskiego pt. *Analiza nośności dźwigarów kratowych z imperfekcjami geometrycznymi* spełnia warunki i wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r., o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki, z późniejszymi zmianami (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789) i w związku z tym wnoszę do Rady Wydziału Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Abiegus