

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Rykałuk
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Wrocław, dnia 16.12.2017 r

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Rafała Piotrowskiego pt. „Wpływ sztywności węzłów
na zwichrzenie belek”,
wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury
Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach
(Umowa o dzieło nr XII/Dec-B/16/2017 z dnia 28.09.2017)

1. Informacje wstępne

Recenzowana rozprawa zawiera 176 stron maszynopisu, w tym 1 strona tytułowa, 2 strony jako podziękowania promotorowi i promotorowi pomocniczemu, po 1 stronie streszczeń w jęz. polskim i angielskim, 2 strony spisu treści, 2 strony oznaczeń oraz 5 stron wykazu literatury. W tekście zasadniczym znajdują się 73 rysunki oraz 38 tabel.

Praca została wykonana w Katedrze Mechaniki, Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych. Promotorem rozprawy jest prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Kowal, a promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Andrzej Szychowski.

Rozprawa zawiera 11 rozdziałów o bardzo zróżnicowanych objętościach – minimum to 1 strona (rozdział 9-ty), maksimum to 66 stron (rozdział 10-ty).

Pracę można zakwalifikować przedmiotowo do wytrzymałości konstrukcji metalowych w dyscyplinie budownictwo.

2. Treść rozprawy

Rozpoznanie tematu, zawarte w rozdziale pierwszym, zostało przeprowadzone na szerokim zbiorze literaturowym, obejmującym 105 pozycji bibliograficznych różnej rangi (książki, czasopisma, normy), począwszy od roku 1929.

W omówieniu rozpoznania literaturowego Autor szczególną uwagę poświęcił dotychczas stosowanym rozwiązaniom konstrukcyjnym połączeń końców belek z innymi elementami stalowych konstrukcji nośnych (np. słupami szkieletów czy też belkami rusztów), głównie pod kątem sztywności węzłów. Doszedł do wniosku, że większość dotychczasowych rozwiązań konstrukcyjnych dotyczy połączeń na śruby typu zakładkowego lub doczołowego, które w większości przypadków są węzłami podatnymi, a które w wielu przypadkach można modelować w schematach statycznych jako belki jednoprzęsłowe o podparciu widelkowym, dającym najniższą odporność na zwichrzenie. Za główny cel rozprawy zostało postawione zwiększenie sztywności węzłów poprzez zmianę zamocowań belek w konstrukcji szkieletowej typu rusztów płaskich.

Rozdział drugi jest poświęcony głównie omówieniu konstrukcjom stref przypodporowych belek, które mają w najwyższym stopniu uniemożliwić deplanację powierzchni czołowych. Tego typu konstrukcje wynikły z przeglądu literatury. Wytypowano 6 typów konstrukcji podporowych belek i zostały one zestawione w tabeli 2.1. Konstrukcja żebra podporowego własnego pomysłu o przekroju kołowym zamkniętym jest [pokazana na rys. 2.3. Autor zakłada, że takie żebro jest najbardziej skuteczne przy skrępowaniu deplanacji.

W dalszej części tego rozdziału Doktorant przedstawił niekonwencjonalną klasyfikację węzłów, opartą na kryterium dotrzymania ciągłości w przekazywaniu sił przekrojowych oraz odkształceń. Tę klasyfikację nazwał dotrzymaniem geometrycznej topologii.

W rozdziale trzecim zostały omówione przedmiot i cel pracy, założenia obliczeniowe oraz zostały przedstawione tezy pracy w liczbie trzech, przy czym teza trzecia zawiera trzy człony. Zatem w sumie można mówić o pięciu tezach.

W rozdziale czwartym przedstawiono sposoby wyznaczania momentu krytycznego belek zginanych. Są to 2 sposoby analityczne (całkowanie układu równań różniczkowych, opisujących wychyloną oś środków ścinania oraz metoda energetyczna), doświadczalne i sposoby numeryczne bazujące na MES. Zaznaczył, że w swojej rozprawie będzie stosował metodę energetyczną, a poszukiwanie minimum tej energii przeprowadzi za pomocą sposobu Rayleigha-Ritza.

W dalszej części rozdziału czwartego został przedstawiony wzór na M_{cr} według normy europejskiej i jego modyfikacje w przypadku zastosowania blach czołowych. Dużo uwagi poświęcił omówieniu najbardziej ogólnego wzoru prof. Giżejowskiego, uwzględniającego sprężyste zamocowania każdego końca belki w trzech kierunkach. Na podstawie wykonanych przez siebie obliczeń belki I300 Autor stwierdził, że obliczenia wg wzoru Giżejowskiego i wg programu własnego LTBeam mają duże różnice (por. wykresy na rys. 4.6), wobec czego podejmuje się uzyskać rozwiązanie analityczne dające większą zbieżność z rozwiązaniami numerycznymi MES, które uważa za najbardziej dokładne.

Rozdział piąty zawiera wzory na współczynniki sprężystego zamocowania końca belki podpartej przegubowo w płaszczyźnie zginania ze względu na obrót boczny α_u i ze względu na deplanację α_ω , a także własne propozycje wyrażen na bezwymiarowe wskaźniki sprężystego zamocowania κ_u i κ_ω . W zakończeniu tego rozdziału Autor przedstawił własne propozycje wyznaczania współczynników sprężystego zamocowania α_u i α_ω dla belek będących elementami składowymi rusztu.

W rozdziale szóstym Doktorant przedstawił własnego pomysłu wzory aproksymacyjne na funkcję przemieszczenia bocznego $u(x)$ i kąta skręcenia przekroju $\varphi(x)$. Są to wyrażenia potęgowe wielomianowe współrzędnej względnej x/L – po trzy wielomiany W_{Pi} stopnia 4-go, 5-go i 6-go dla podparcia przegubowego oraz po trzy wielomiany W_{Ui} stopnia 4-go, 5-go i 6-go dla sztywnego zamocowania. Wyrażenia na funkcje przemieszczeń dla belek zamocowanych sprężysto w kierunku bocznym oraz w kierunku deplanacji uzyskano dzięki odpowiedniemu sprzężeniu wielomianów W_{Pi} oraz W_{Ui} za pomocą wskaźnika κ_u dla funkcji $u(x)$ i za pomocą wskaźnika κ_ω dla funkcji $\varphi(x)$.

Rozdział siódmy zawiera wyrażenia na energię sprężystą belki sprężysto zamocowanej. Dla 10-ciu schematów rozłożenia obciążenia na belce zostały przedstawione wzory całkowite na pracę obciążenia zaczepionego na dowolnej wysokości z_g względem środka ścinania przekroju poprzecznego.

Krótki, bo jednostronicowy rozdział ósmy ma charakter informacyjny, gdyż zaprezentowano w nim trzy wersje programu własnego M_{LTB} , który służy do obliczania momentu krytycznego zwichtzenia belki o przekroju bisymetrycznym dwuteowym. Poszczególne wersje dotyczą belki o podparciu widełkowym, belki o sprężystym zamocowaniu przeciwko deplanacji i belki o sprężystym zamocowaniu przeciwko deplanacji i przeciwko obrotowi bocznemu.

W rozdziale dziewiątym są podane wzory na M_{cr} , wyprowadzone przez Doktoranta na podstawie metody energetycznej. Są to wzory (9.1) ÷ (9.9). W stosunku do wzorów normowych, a szczególnie do wzoru z PN-EN 1993-1-1, są one wzbogacone o wyrażenia podane w tabelach (9.1) ÷ (9.8), zawierające wskaźniki sprężystego zamocowania końców - κ_u ze względu na obrót boczny i κ_ω ze względu na spaczenie. Wzory na M_{cr} zostały wyprowadzone dla 10-ciu schematów obciążenia belki.

Największy objętościowo, bo liczący 66 stron, rozdział dziesiąty zawiera wyniki obliczeń dla sześciu belek dwuteowych o przekroju IPE, HEA i HEB przy uwzględnieniu dwóch ich wysokości - 300 i 500 mm oraz dwóch rozpiętości przęseł – $L = 5,0$ m i $7,0$ m przypadku przekrojów niższych (tzn. 300 mm) oraz $L = 8,0$ m i $10,0$ m w przypadku przekrojów wyższych (tzn. 500 mm). Dla każdej geometrii belki obliczono M_{cr} , rozpatrując 10 schematów obciążeń oraz pełną kombinację 6-ciu wartości wskaźnika $\kappa_u = 0; 0,25; 0,50; 0,75; 0,9; 1,0$ i wskaźnika $\kappa_\omega = 0; 0,25; 0,50; 0,75; 0,9; 1,0$. Wyniki obliczeń zestawiono w tabelach oraz na wykresach rozdziału 10.1. Liczba wszystkich przykładów obliczeniowych przekracza 3 000.

Analiza wyników obliczeń posłużyła Autorowi do wyciągnięcia pewnych wniosków praktycznych, dotyczących wpływu wartości wskaźników utwierdzenia na M_{cr} . Z bardzo ciekawych porównań w stosunku do podparcia widełkowego, zamieszczonych na str. 132 wynika, że :

- największy wzrost M_{cr} występuje dla zakresu κ_ω od 0,75 do 1,0, niezależnie od wartości κ_u ,
- większy wpływ na wzrost M_{cr} ma wskaźnik κ_ω niż wskaźnik κ_u ,
- wpływ wzrostu utwierdzeń w rozważanych kierunkach maleje wraz ze wzrostem rozpiętości belki, bo np. przy pełnych obu utwierdzeniach dla belki I300 obciążonej równomiernie wzrost M_{cr} wynosi 209% dla $L = 5,0$ m i 123% dla $L = 7,0$ m oraz odpowiednio 115% i 47%, gdy $\kappa_\omega = 1$ a $\kappa_u = 0$.

Należy nadmienić, że każdy przypadek obliczeniowy był rozwiązywany trzykrotnie, tzn.

- wg wyprowadzonego wzoru własnego,
- wg programu komercyjnego Abaqus,
- wg programu własnego M_{LTB} ,

przy czym każdorazowo wyliczano różnice procentowe między wynikami.

Druga część rozdziału 10-go jest poświęcona wyborowi najbardziej skutecznej konstrukcji żebra podporowego ze względu na skrępowanie deplanacji. Do tego celu wykorzystano wzory przedstawione przez innych autorów, znajdujące się w cytowanej literaturze, oraz propozycję własną, opartą na stosowaniu żebra kołowego zamkniętego. Każdy typ żebra był analizowany obliczeniowo trzykrotnie dla wybranych przekrojów i rozpiętości przęseł, przy czym w programie Abaqus nie stosowano wskaźników sprężystego zamocowania a odwzorowywano rzeczywistą geometrię detali składowych żeber.

Wyniki obliczeń dla żebra w postaci blachy czołowej o zmieniającej się grubości od 0 do 50 mm są przedstawione na wykresach. Dla pozostałych typów żeber wyniki są zestawione w tabelach 10.11 ÷ 10.17, przy czym rozwiązanie wzorem własnym oraz programem własnym wymagało uprzedniego oszacowania wskaźnika κ_ω .

W ostatniej części rozdziału 10-go znajduje się przykład liczbowy dla belki będącej elementem składowym rusztu trójbelkowego o rzucie poziomym typu H.

Ostatni rozdział jedenasty jest podsumowaniem rozprawy wraz z 13-oma wnioskami z niej wypływającymi.

3. Ocena rozprawy

3.1. Wybór tematu

Utrata stateczności konstrukcji metalowych jest, obok pęknięć statycznych i zmęczenia, jedną z głównych przyczyn awarii i katastrof. W zginanych belkach pełnościennych utrata statecznego początkowego położenia równowagi następuje wskutek zjawiska zwanego zwichrzeniem. Przy obciążeniu bifurkacyjnym przekroje poprzeczne doznają dwóch nowych

składowych deformacji – przemieszczenia w kierunku bocznym do płaszczyzny zginania oraz skręcenia wokół osi podłużnej.

Obciążenie bifurkacyjne jest określane wartością momentu krytycznego M_{cr} , obliczanego w miejscu działania największego przeszłowego momentu zginającego.

Zagadnienie wyznaczania momentu krytycznego przy zwichrzeniu belek w ogólności, a belek dwuteowych w szczególności, zostało zapoczątkowane w Petersburgu przez prof. S. Timoszenkę w 1904 r. Bazował on na założeniach klasycznej wytrzymałości materiałów, głównie Naviera i Bernoulliego. Dopiero trzydzieści lat później to zagadnienie zostało rozbudowane przez prof. W.Z. Własowa z Moskwy o teorię prętów cienkościennych, mających przekroje sztywne. W takiej postaci teoria ta jest wykorzystywana do czasów teraźniejszych.

Wyprowadzony przez Własowa układ trzech równań różniczkowych o pochodnych cząstkowych czwartego rzędu ze zmiennymi współczynnikami przy dowolnej zmienności obciążenia przeszłowego można rozwiązać jedynie sposobem przybliżonym. Najwygodniejszy jest sposób ortogonalizacyjny Bubnowa-Galerkina, gdy składowe deformacji belki oraz funkcję obciążenia przyjmie się w postaci szeregów trygonometrycznych spełniających warunki brzegowe belki.

Metodą łatwiejszą, a równocześnie bardziej funkcjonalną, bo pozwalającą uwzględnić złożone warunki sprężystego zamocowania końców belki na podporach jest metoda energetyczna. Wymaga ona jednak dobrania odpowiednich szeregów aproksymujących położenie wychylone belki.

Problem wyznaczania M_{cr} belek, jako elementów składowych metalowych ustrojów szkieletowych, czyli belek sprężyste zamocowanych na podporach jest w dalszym ciągu podejmowany. Widać to przede wszystkim na międzynarodowych konferencjach, jak chociażby Międzynarodowe Konferencje Konstrukcji Metalowych (ICMS) pod patronatem Polskiej Akademii Nauk (PAN), czy Eurosteel pod patronatem Europejskiego Komitetu Konstrukcji Stalowych (ECCS). Całościowe poznanie nośności granicznej wymaga analizy bifurkacyjnej (inaczej stateczności I rodzaju) oraz analizy dywergencyjnej (czyli stateczności II rodzaju). Tym nie mniej samo wyznaczenie obciążenia bifurkacyjnego jest istotne w procesie projektowania.

Chociażby w tak skrótowym przedstawieniu historii zwichrzenia belek metalowych widać, że podjęty przez Doktoranta temat dysertacji pt. „Wpływ sztywności węzłów na zwichrzenie belek” jest aktualny z naukowego punktu widzenia, a jest potrzebny z aplikacyjnego punktu widzenia. Właściwe uwzględnienie współczynników sprężystego zamocowania końców belki, nie tylko rozwiewa wątpliwości projektanta stosującego wzory normowe, ale przede wszystkim pozwala oszacować realne zapasy nośności.

3.2. Rozpoznanie literaturowe

Spis literatury zawiera 105 pozycji różnej rangi, a więc książki wybitnych koryfeuszy nauki z zakresu stateczności konstrukcji, takich jak (S.P. Timoshenko, Z. Brzoska, J. Naleszkiewicz, V. Brzezina, W.Z. Własow, N.S. Trahair z zespołem, S. Weiss i M. Gizejowski), ale także artykuły w czasopismach w większości z listy A oraz materiały konferencyjne.

Uważam, że dużą zaletą rozprawy jest bazowanie na pozycjach książkowych, gdyż nie można pracować nad nowym zagadnieniem, jeżeli nie pozna się podstaw teoretycznych tam się znajdujących. Można się wtedy zorientować o tym, gdzie i jakie luki naukowe są do wypełnienia, które dawniej nie były możliwe do rozwiązania chociażby ze względu na ówczesny brak maszyn cyfrowych oraz Metody Elementów Skończonych.

W obecnych czasach zauważa się wykonywanie rozpraw naukowych się w trybie przyspieszonym. W niektórych przypadkach spis literatury zawiera jedynie czasopisma przedstawiane w formie elektronicznej, czyli od roku 1995.

3.3. Ujęcie problemu

Dzięki dobremu rozpoznaniu literaturowemu Doktorant wynalazł tzw. białe plamy w problemie zwichrzenia belek stalowych. A były to:

- 1) - sprężyste zamocowanie końców belki przeciwko wygięciu bocznemu względem płaszczyzny zginania jednokierunkowego oraz przeciwko deplanacji przekrojów czołowych,
- 2) - inne warunki rozkładu obciążenia na belce w stosunku do tych, które są uwzględnione we wzorach normowych,
- 3) - sposoby takiego konstruowania węzłów spawanych, aby otrzymać jak największe wartości współczynników sprężystego zamocowania.

3.4. Sposób rozwiązania

Przedstawione powyżej w p. 3.3 zagadnienia zostały rozwiązane sposobem analitycznym przy wykorzystaniu metody energetycznej. Potrzebne w tej metodzie przybliżone funkcje aproksymujące deformacje belki Autor przedstawił w postaci wielomianów potęgowych 4-go, 5-go i 6-go stopnia, które są Jego pomysłu.

Wielomiany zawierają współczynniki wolne- różne dla belki podpartej przegubowo i dla belki utwierdzonej sztywno. Odpowiednie sprężenie obydwu grup wielomianów odbywa się za pomocą wskaźników sprężystego zamocowania. W zaproponowanych wielomianach ważne jest to, że tylko sam wskaźnik κ_u występuje w wyrażeniu na ugięcie boczne oraz tylko sam wskaźnik κ_ω występuje w wyrażeniu na deplanację przekroju.

W celu udowodnienia prawidłowości zaproponowanego sposobu rozwiązania Autor wykonał przykłady obliczeniowe dla bardzo dużego zbioru przypadków walcowanych belek dwuteowych o dwóch wysokościach przekroju, dwóch rozpiętościach przęsła, 10-ciu rozkładach obciążenia na belce oraz pełnej kombinacji 10-ciu wskaźników κ_u i κ_ω . Za bazę odniesienia zostało przyjęte rozwiązanie MES znanym i szeroko stosowanym na świecie programem Abaqus, a dodatkowo programem własnym M_{LTB} . Największe różnice dochodzą zaledwie do kilku procent. Zatem, wzory własne Autora (9.1) ÷ (9.9) oraz program własny M_{LTB} , wraz z dwoma jego wersjami szczegółowymi, na obliczenie M_{cr} są poprawne.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

4.1. W wielu miejscach rozprawy Autor sugeruje, że tylko ściśle geometryczna topologia konstrukcji zapewnia maksymalne zwiększenie momentu krytycznego belki zginanej. Tymczasem zachowanie tego postulatu stanowi istotne utrudnienie w pracach montażowych, szczególnie rusztów, chociażby tak prostego rusztu, jaki jest przedstawiony na rys. 2.14 na str. 41. Praktycznie wszystkie węzły konstrukcji musiałyby być spawane, co jest sprzeczne z racjonalnym postulatem wytwarzania konstrukcji metalowych – aby wszystkie połączenia warsztatowe były spawane, natomiast wszystkie połączenia montażowe były śrubowane.

4.2. Postulat zachowania ściśle geometrycznej topologii jest źródłem powstania dużej wartości naprężeń własnych – swobodnych i reaktywnych. Te drugie są szczególnie duże w strefie wstawiania belek „zamykających” ruszt,

4.3. Jak wynika z wniosków zamieszczonych w rozprawie największy wpływ na wzrost momentu krytycznego ma sztywność deplanacyjna EJ_ω . W belkach o przekroju dwuteowym ta sztywność zależy tylko od sztywności samych pólek, podobnie zresztą jak sztywność boczna EJ_y . Z tego powodu w węzłach przedstawionych na rys. 2.8b (str. 35), 2.10a (str. 37), 2.12

a,b (str. 39) nie ma konieczności spawania środka. Można połączyć go na śruby w kategorii obliczeniowej A, co częściowo zniwelowałoby trudności robót montażowych.

4.4. W świetle konstatacji z p. 3.2 konstrukcja węzła z rys. 2.11a (str. 38) nie zapewnia dużego oporu na deplanację przekroju końcowego belki nr 1, gdyż na szerokości stopki dolnej środek belki nr 2 nie stawia oporu dla odkształceń ε_{ω} .

4.5. Propozycja określania współczynnika sprężystego zamocowania α_{ω} przeciw deplanacji w postaci wzoru 5.11a jest błędna. Sztywność deplanacyjna EJ_{ω} belki brzegowej nie może stanowić oporu przeciw deplanacji belki usytuowanej prostopadle. O tym będzie decydować sztywność gięta EJ_y belki brzegowej. Jednak wartość mnożnika przy tej sztywności przypuszczalnie wymagałaby osobnej rozprawy. Jest to jeden z tematów, którym Doktorant mógłby się zająć w dalszej pracy naukowej.

4.6. Na rys. 1.4 (str. 16) zapis ogólnej sztywności przekroju na skręcanie wymaga korekty, gdyż nie ma zgodności jednostek.

4.7. Wśród uwag krytycznych zamieszczam 2 pytania, na których odpowiedzi będą oczekiwałem podczas obrony:

- 1) - jakie są różnice między wynikami uzyskanymi ze wzoru (9.7) oraz ze wzoru normowego - np. dla belki obciążonej równomiernie i siłą skupioną ?
- 2) - dlaczego pominięto podejście Gizejowskiego, uwzględniającego także sprężyste zamocowania końców belki na obrót w płaszczyźnie obciążenia ?
(nie można zastosować rozwiązania Autora, wstawiając wartość momentu otrzymanego z rozwiązania statycznego układu konstrukcyjnego, gdyż przedstawione rozwiązania dotyczą tylko momentów podporowych przy sztywnym zamocowaniu dla rozpatrywanego rozkładu obciążenia na belce).

4.8. Inne uwagi dotyczące formy redakcyjnej i formalnej rozprawy przekazałem Doktorantowi w formie korespondencyjnej i otrzymałem na nie odpowiedzi.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że:

- 1) Temat rozprawy jest aktualny i stanowi ważne zadanie naukowe w dziedzinie konstrukcji metalowych.
- 2) Doktorant wystarczająco rozpoznał literaturę przedmiotu badań.
- 3) Postawione tezy są prawidłowe z naukowego punktu widzenia.
- 4) Udowodnienie tez zostało przeprowadzone poprawnie na drodze analitycznej oraz numerycznej.
- 5) Doktorant wykazał się szeroką znajomością wiedzy teoretycznej w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie budownictwo.
- 6) Jest On przygotowany do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Wniosek końcowy:

W świetle powyższych stwierdzeń uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Piotrowskiego pod tytułem „Wpływ sztywności węzłów na zwichrzenie belek” spełnia wszystkie wymagania Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 (Dz.U. nr 65, poz. 595) z późniejszymi zmianami, wobec czego stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

