

dr hab. inż. Maciej Szumigała prof. nadzw.
Instytut Konstrukcji Budowlanych
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Politechniki Poznańskiej
ul. Piotrowo 5
60-965 Poznań

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Słowińskiego pt. "**Badanie nośności ściskanych osiowo elementów bliskogałęziowych z podatnymi połączeniami**"

1. Podstawa opracowania

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Słowińskiego pt. " Badanie nośności ściskanych osiowo elementów bliskogałęziowych z podatnymi połączeniami" ,wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Waltera Wuwera profesora Politechniki Śląskiej, opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Jana Ślusarka, z dnia 6 lipca 2013 roku.

2. Treść rozprawy

Przedstawiona praca składa się z 5 rozdziałów, bibliografii, streszczenia w języku polskim, dwóch załączników Z1 i Z2 oraz wykazu podstawowych oznaczeń. Praca liczy łącznie 139 stron.

Tytuły poszczególnych rozdziałów:

Rozdział 1 – Wprowadzenie (poprzedzony wykazem podstawowych oznaczeń)

Rozdział 2 – Cel i zakres pracy

Rozdział 3 – Badania elementów złożonych krępych

Rozdział 4 – Badania elementów złożonych smukłych

Rozdział 5 – Zakończenie

W rozdziale pierwszym (Wprowadzenie), który zawiera 2 podrozdziały:

– Geneza tematu

– Przegląd literatury

przedstawiono źródło tematu pracy oraz dokonano przeglądu piśmiennictwa.

Geneza tematu opiniowanej rozprawy, zdaniem autora, wynika z postulatów budownictwa zrównoważonego, a zwłaszcza z konieczności ograniczania zużycia energii. Przejawiać się to powinno w racjonalnym kształtowaniu obiektów budowlanych, a w obszarze budownictwa

stalowego stosowaniem lekkich kształtowników profilowanych na zimno z blach. Konieczność unifikacji konstrukcji cienkościennych wymusza poszukiwanie efektywnych sposobów łączenia elementów w węzłach za pomocą łączników mechanicznych. Łączniki te stosuje się najczęściej do łączenia kształtowników giętych otwartych. Bardziej efektywne są jednak przekroje zamknięte. Zastosowanie innowacyjnego systemu jednostronnych łączników typu BOM umożliwia wykorzystanie zarówno kształtowników otwartych, jak i zamkniętych oraz optymalizację konstrukcji przez lokalne poprawianie parametrów wytrzymałościowych wybranych elementów (pręty złożone bliskogałęziowe). Łączniki te można stosować również do modernizacji i wzmacniania konstrukcji stalowych.

Druga część omawianego podrozdziału zawiera obszerny przegląd piśmiennictwa dotyczącego następujących zagadnień:

- optymalny dobór kształtu przekroju prętów zimnogiętych, jednogałęziowych, ściskanych,
- kształtowanie elementów o przekrojach złożonych,
- sposoby wykonywania połączeń mechanicznych zwłaszcza między gałęziami w prętach złożonych.

Autor przedstawia najpierw publikacje prezentujące poszukiwania różnych optymalnych kształtów profili zimnogiętych osiowo ściskanych o przekrojach otwartych, półzamkniętych i zamkniętych oraz wyniki badania ich nośności. Następnie omawiane są cienkościennie konstrukcje prętowe o przekrojach złożonych z ceowników, zetowników, sigm i rur prostokątnych oraz poszukiwania różnych sposobów wzmacniania konstrukcji cienkościennych (w tym o przekrojach zamkniętych) nawet w połączeniu z kompozytami. W ostatniej części opisano różne sposoby łączenia poszczególnych gałęzi prętów złożonych i wzmacnianych, oraz omówiono kilka systemów łączników mechanicznych, ze szczególnym uwzględnieniem łączników jednostronnych typu BOM.

Rozdział drugi (*Cel i zakres pracy*) jest bardzo krótki, na niepełnych dwóch stronach przedstawiono cel podjęcia tematu i przedstawiono w punktach zakres pracy. Cel pracy sformułowano prosto i jednoznacznie, jako próbę opisu zachowania się złożonego elementu bliskogałęziowego, składającego się z trzech gałęzi i obciążonego osiowo. Współpracę gałęzi zapewniają sworznie jednostronne typu BOM. Zachowanie powyższego elementu bliskogałęziowego opisano za pomocą przygotowanego teoretycznego modelu analitycznego, który zweryfikowano eksperymentalnie. W modelu uwzględniono imperfekcje geometryczne i technologiczne.

Zakres pracy obejmuje: studia literaturowe, badania teoretyczne i doświadczalne prętów krępych i prętów smukłych oraz przedstawienie propozycji do analiz i projektowania prętów bliskogałęziowych z podatnymi połączeniami na sworznie typu BOM.

Rozdział trzeci (*Badania elementów złożonych krępych*) poświęcony jest ustaleniu formuły rozdziału siły osiowej na trzy gałęzie pręta złożonego bliskogałęziowego krępego oraz ocenie wpływu podatności łączników BOM na stopień współpracy gałęzi.

Najpierw przedstawiono założenia, model geometryczny i schemat obliczeniowy pręta złożonego bliskogałęziowego krępego, a następnie omówiono sformułowany wcześniej model analityczny. Wychodząc z założenia, że przyrost odkształceń w przekroju złożonym $\Delta\varepsilon$ jest różnicą odkształceń przekroju pręta ε_U (tj. ceowników) i odkształceń wzmocnienia ε_R (przekroju rurowego), uwzględniając równowagę sił wewnętrznych w gałęziach przekroju oraz posługując się zależnością między siłami ścinającymi T_i w łącznikach i poślizgami w połączeniu v_i , otrzymano układ równań. Przyrost poślizgu Δv_i zdefiniowano jako sumę (całką) przyrostu odkształceń $\Delta\varepsilon_i$ na odcinku między łącznikami. Z otrzymanego układu równań wyliczono siły ścinające T_i w poszczególnych łącznikach. Uwzględniając w równowadze sił wewnętrznych, oprócz siły osiowej N , obliczone siły ścinające T_i , ustalono udział poszczególnych gałęzi w przenoszeniu obciążenia osiowego pręta. Procentowy udział gałęzi rurowej w przenoszeniu obciążenia granicznego na poszczególnych odcinkach między łącznikami przedstawiono na wykresie (rys 3.11). Na wykresie tym przedstawiono również maksymalną wartość współpracy wynikającą jedynie z proporcji sztywności osiowej poszczególnych gałęzi. Dla trzech badanych słupów jest ona zawsze większa i wynosi 43,8 %. Potwierdza to celowość poszukiwania podatności łączników, gdyż jak się okazuje, ten tradycyjny sposób obliczeń może prowadzić do niedoszacowania sił w gałęziach np. wzmocnianego pręta.

Celem potwierdzenia słuszności przedstawionego modelu oraz wyników obliczeń przeprowadzono eksperyment fizyczny, który został opisany w podrozdziale 3.4. W kolejnych podpunktach tego podrozdziału opisano przygotowanie elementów próbnych, stanowisko badawcze oraz procedurę badawczą, a wszystko bogato zilustrowano rysunkami i fotografiami.

W przedostatnim podrozdziale 3.5 dokonana została analiza wyników badań doświadczalnych i teoretycznych. W podpunkcie 3.5.1 tego podrozdziału przedstawiono zasadniczy wykres (ścieżkę równowagi statycznej) obciążenie osiowe - skrócenie słupa i otrzymano idealną zbieżność między wynikami obliczeń a rezultatami badań. Przedstawiono

na zdjęciach i krótko omówiono również formy zniszczenia elementów bez przewidywanej utraty stateczności globalnej.

W kolejnym podpunkcie 3.5.2 porównano uzyskane z obliczeń i badań wyniki rozdziału siły osiowej na współpracujące gałęzie dla różnych poziomów obciążenia (rys. 3.12). I w tym przypadku otrzymano zadawalającą zgodność z wyjątkiem pierwszego niskiego poziomu obciążenia, co autor słusznie tłumaczy (i potwierdza wykresami na rys. 3.13) niewielkim wpływem podatności łączników BOM w początkowej fazie obciążenia.

W ostatnim podpunkcie tego podrozdziału doktorant porównał wyniki pomiarów przemieszczeń (podatności) w osi łączników i sił ścinających w łącznikach z zależnością analityczną zaczerpniętą z badań profesora Wuwera.

Ostatni krótki podrozdział 3.6 zawiera syntetyczne podsumowanie całego rozdziału

Rozdział czwarty (*Badania elementów złożonych smukłych*) stanowi drugą obszerną część pracy poświęconą analizie teoretycznej i badaniom eksperymentalnym elementów zinnogiętych bliskogałęziowych smukłych połączonych jednostronnymi łącznikami typu BOM.

Zgodnie z pierwszym podrozdziałem (4.1) celem badań były:

- ustalenie obliczeniowe i eksperymentalne nośności granicznej na osiowe ściskanie z uwzględnieniem wyboczenia obciążonego wstępną krzywizną,
- ocena wpływu podatności łączników na stopień współpracy gałęzi pręta.

W drugim podrozdziale uzasadniono wybór rodzaju przekroju oraz wielkość i wymiary elementów poddanych analizie. Gałąź główna elementu była tym razem przekrojem zamkniętym rurowym prostokątnym, a gałęzie wzmacniające wykonano z ceowników zinnogiętych dołączonych środkami do szerszego boku rury. Parametrami determinującymi wymiary modelu były możliwości (i tak duże) stendu badawczego i założona forma utraty nośności (stateczności).

W podrozdziale 4.3 przedstawiono model analityczny, a w podpunkcie 4.3.1 omówiono przyjęte założenia. Analizie poddano pręt osiowo ściskany podparty przegubowo. Uwzględniono imperfekcje w postaci wstępnej krzywizny elementu oraz jednakowego na długości pręta uproszczonego stanu naprężeń własnych. Założono sprężysto-plastyczny model stali. Jako obliczeniowe kryterium stanu granicznego nośności przyjęto początek uplastycznienia skrajnych włókien przekroju złożonego albo sprężyste wyboczenie pręta lub osiągnięcie nośności obliczeniowej połączenia. Wyboczenie pręta złożonego analizowano oddzielnie w każdej z prostopadłych płaszczyzn.

Podpunkt 4.3.2 prezentuje model dla wybożenia w płaszczyźnie xy , tj. prostopadłej do płaszczyzn przylegania ceowników do rury. Model opiera się na podstawowym założeniu, że w dowolnym punkcie połączenia oraz na odcinku między nimi obowiązuje równość krzywizn wszystkich gałęzi. Krzywizna pręta złożonego jest równa ilorazowi momentu zginającego (wynikającego ze wstępnej imperfekcji łukowej) i sztywności zastępczej zginania. Przyrost odkształcenia $\Delta\varepsilon_R$ w dowolnym styku gałęzi (węźle) jest równy różnicy odkształcenia osiowego ε_R i ε_C oraz krzywizn κ_i pomnożonej odpowiednio przez w_R i w_C (odległości osi gałęzi do płaszczyzny styku). Uwzględniając równowagę sił wewnętrznych, tj. siły osiowej N , sił ścinających T_i i momentu M_x , rozdział momentu zginającego na gałęzie proporcjonalnie do sztywności giętej EI_R , EI_B oraz EI_C , sinusoidalny kształt krzywizn i równanie różniczkowe osi ugięcia, uzyskano układ nieliniowych równań różniczkowych. Rozwiązując układ równań otrzymano ogólne postacie linii ugięcia na poszczególnych odcinkach między połączeniami. Wprowadzając warunki brzegowe, doktorant doprowadził do wzorów na przyrosty przemieszczeń zależne od wartości sił normalnych, ścinających, sztywności giętych i osiowych oraz przemieszczeń wstępnych i końcowych. Podobnie jak w poprzednim rozdziale, uwzględniając zależność między siłą ścinającą w łączniku a jego podatnością, otrzymano układ równań z uwagi na N i T_i . W tym wypadku rozwiązano go iteracyjnie.

W modelu wybożenia pręta złożonego w płaszczyźnie xz równoległej do powierzchni kontaktu rury i dodatkowych ceowników przyjęto, że współpraca między gałęziami realizuje się poprzez przekazywanie sił ścinających w połączeniach. Przyjęto, jak poprzednio, sinusoidalny kształt początkowej osi odkształconej. Wypadkową siłę tnącą T_i w połączeniu rozłożono na składowe $T_{i,x}$ i $T_{i,z}$. Z uwagi na podatność połączeń założono różne krzywizny pręta głównego i ceowników wzmacniających. Wykorzystując równanie różniczkowe pręta mimośrodowo ściskanego dla poszczególnych odcinków, otrzymano układ równań, po rozwiązaniu którego uzyskano ogólne postacie linii ugięcia na poszczególnych odcinkach. Wprowadzenie warunków brzegowych i zależności między siłami ścinającymi a podatnościami połączeń dało układ równań z uwagi na siły ścinające. Założono, że podatność $v_{i,z}$ w kierunku osi z jest równa różnicy ugięć rury $u_{R,i,z}$ i ceowników $u_{C,i,z}$. Z powodu przewidywanych małych podatności przyjęto liniową zależność $T_{i,z}-v_{i,z}$.

Podrozdział 4.4 poświęcony został standardowym badaniom materiałowym (granica plastyczności, wytrzymałości, moduł sprężystości). Kolejny podrozdział przedstawia badania połączeń na sworznie jednostronne typu BOM. Szczegółowo opisana została konstrukcja modeli, przedstawiono i zinterpretowano wyniki inwentaryzacji elementów próbnych,

opisano montaż łączników, przedstawiono procedurę badawczą oraz zaprezentowano wyniki badania podatności i nośności łączników, sposób określenia nośności obliczeniowej połączeń i analityczne ujęcie wyników eksperymentu w zakresie badania podatności. W tej części pracy zamieszczono ciekawy wniosek, że wpływ niedokładności wykonania połączeń uwidocznił się jedynie w fazie początkowej i był nieistotny w dalszych fazach pracy złącza.

Przedostatni rozdział 4.6 zawiera opis, wyniki i porównanie analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych elementów bliskogałęziowych smukłych osiowo ściskanych. Analizie poddano sześć elementów o długości 3000 mm i przekroju złożonym z głównej gałęzi wykonanej z rury R100×60×4 i dwóch wspomagających ceowników U60×30×4 połączonych sworzniami BOM R15-4. W kolejnych podpunktach przedstawiono wyniki szczegółowej inwentaryzacji geometrii przekroju, opis stanowiska, dokładny opis montażu elementów i procedury badawczej a na końcu tego podrozdziału wyniki badań doświadczalnych.

Dwa ostatnie podrozdziały rozdziału 4 to porównanie wyników badań doświadczalnych i analitycznych, a na końcu, zgodnie z przyjętą regułą, podsumowanie całego rozdziału.

Zawarte w tej części pracy wyniki badań doświadczalnych elementów smukłych zostały przedstawione w postaci ścieżek równowagi statycznej *siła osiowa – przemieszczenie poziome* w środku rozpiętości w kierunku osi x i z . Mimo pewnego rozrzutu należy uznać, że ogólny „trend” został zachowany. Doktorant starał się poprawnie zinterpretować te rozbieżności. Badania eksperymentalne stateczności zawsze obarczone są dużą dozą niepewności, z uwagi na wiele różnych wpływów i imperfekcji. Słuszna wydaje się w tej sytuacji filozofia ustalenia nośności obliczeniowej jako określonej statystycznie na podstawie minimum z nośności granicznej, plastycznej i nośności łączników.

Rozdział piąty (Zakończenie) jako ostatni zawiera całościowe podsumowanie rezultatów pracy, uwypukla najważniejsze osiągnięcia pracy, w uwagach ogólnych jeszcze raz przypomina genezę tematu oraz przedstawia kierunki dalszych badań.

3. Ocena rozprawy

Układ opiniowanej pracy jest jasny i czytelny, język poprawny i logiczny, bez „zadęcia naukowego”. Przedstawiane w pracy opisy są jasne i wolne od zbędnej szczegółowości, wnioski są jednoznaczne i wynikają ze spójnego logicznego ciągu rozumowania. Elementy graficzne (wykresy, rysunki i zdjęcia) są czytelne, odpowiednio rozmieszczone, ich ilość i wielkość jest właściwa i nie dominują nad tekstem (nie są zbędnym „wypełniaczem”).

W recenzowanej rozprawie doktorskiej podjęto udaną próbę oceny nośności i stateczności ściskanych osiowo krępych i smukłych, zimnogiętych elementów bliskogałęziowych

składających się z trzech gałęzi o przekrojach otwartych i zamkniętych połączonych jednostronnymi sworzniami typu BOM.

Stosowanie konstrukcji zimmogiętych wynika z dążenia do optymalnego kształtowania konstrukcji, umożliwia unifikację i dzięki zastosowaniu łączników mechanicznych racjonalizację i skrócenie montażu. Zastosowanie łączników jednostronnych typu BOM pozwala na stosowanie znacznie korzystniejszych przekrojów zimmogiętych cienkościennych zamkniętych (rurowych). Jest to zatem realizacja ważnego postulatu budownictwa zrównoważonego, dążącego do oszczędności zasobów naturalnych i energii. Analizowane w recenzowanej pracy ściskane osiowo elementy bliskogałęziowe składające się z przekrojów ceowych i rury prostokątnej, połączone jednostronnymi sworzniami, mogą służyć do lokalnego poprawienia parametrów wytrzymałościowych w nowo projektowanych stalowych konstrukcjach prętowych, mogą również być sposobem modernizacji i wzmacniania istniejących konstrukcji.

Nośność prętów trójgałęziowych wzajemnie połączonych łącznikami mechanicznymi na długości, wydaje się być na pierwszy rzut oka prostym zadaniem inżynierskim. Należy jednak pamiętać, że profile zamknięte (rury prostokątne) są bardzo kłopotliwe we wzajemnym łączeniu w węzłach za pomocą łączników mechanicznych. W węzłach łączy się zazwyczaj ze sobą przez zastosowanie łączników mechanicznych pręty zimmogięte o przekrojach otwartych lub pręt o przekroju zamkniętym z pętami o przekrojach otwartych (łączniki jednostronne), wskutek czego nie wszystkie gałęzie analizowanego pręta trójgałęziowego dochodzą do węzła. Z tego powodu dla oceny nośności i stateczności takich przekrojów ważny jest stopień współpracy poszczególnych gałęzi wynikający z podatności łączników mechanicznych. Okazuje się, że klasycznie przyjmowany sposób rozdziału sił (tj. proporcjonalnie do powierzchni przekroju) na poszczególne gałęzie może prowadzić do znacznego niedoszacowania nośności w przypadku np. wzmacniania. Jest to zatem zagadnienie ważne z punktu widzenia praktyki inżynierskiej. Istotne jest również to, że przeanalizowano dwa (a praktycznie trzy) przypadki pracy elementów osiowo-ściskanych, tj. elementy krępe (bez wyboczenia) oraz elementy smukłe z uwzględnieniem wyboczenia (zarówno w płaszczyźnie przylegania gałęzi jak i w płaszczyźnie prostopadłej). Należy podkreślić fakt uwzględnienia imperfekcji, zarówno w postaci wstępnego wygięcia jak i naprężeń rezidualnych w przekroju. Na podkreślenie zasługuje zastosowanie innowacyjnych jednostronnych łączników typu BOM i wykorzystanie „pozakatalogowego” zakresu ich pracy, przez dopuszczenie do poślizgów i uplastycznienia przy docisku, co znacznie obniża ilość łączników w połączeniu.

Najważniejszym atutem pracy jest to, że zbudowane modele analityczne zostały z pełnym sukcesem zweryfikowane wynikami eksperymentu w skali technicznej.

Jako oryginalne osiągnięcie autora rozprawy można uznać:

- Przygotowanie modelu analitycznego trójgałęziowego pręta **krępego** zimnogiętego bliskogałęziowego poddanego osiowemu ściskaniu,
- Przygotowanie modelu analitycznego trójgałęziowego pręta **smukłego** zimnogiętego bliskogałęziowego poddanego osiowemu ściskaniu z uwzględnieniem imperfekcji,
- **Sprawne matematycznie rozwiązania** (uzyskanie konkretnych wyników z nieliniowych układów równań różniczkowych) w przedstawionych modelach analitycznych,
- Przygotowanie i przeprowadzenie **obszernego programu eksperymentu fizycznego** na modelach w skali technicznej zarówno dla prętów krępych jak i smukłych,
- Rzetelne przeprowadzenie **szeregu analiz i badań uzupełniających**, jak badania materiałowe, badania nośności i podatności łączników oraz analiza wpływu błędów i niedoskonałości montażowych,
- **Obszerna analiza porównawcza** wyników obliczeń analitycznych z rezultatami badań eksperymentalnych.

4. Uwagi krytyczne

Każde dzieło człowieka jest w zasadzie niedoskonałe, choć niektórzy uważają, że bywają wyjątki. Rolą recenzenta jest nie tylko podkreślenie pozytywnych cech pracy, ale także życzliwe wykazanie pewnych niedoskonałości i rozumiem, że tak zostanie to przyjęte przez doktoranta.

Po lekturze rozprawy nasuwają mi się pewne, przyznaję subiektywne, uwagi, wnioski czy może wątpliwości.

We współczesnych pracach naukowych weryfikacja modelu analitycznego odbywa się często dodatkowo lub tylko przy pomocy modelu mes. Istnieje obecnie wiele dostępnych systemów opartych na metodzie elementów skończonych. Można w końcu posłużyć się programami inżynierskim o dość dużych już obecnie możliwościach. Interesujące byłoby dodatkowe nałożenie na istniejące wykresy jeszcze jednej, trzeciej ścieżki równowagi statycznej otrzymanej z modelu MES.

Zaproponowane modele analityczne są poprawne i dość jasne lecz skomplikowane w praktycznym zastosowaniu z uwagi na duże układy równań nieliniowych. Bez

zastosowania narzędzi numerycznych (odpowiednich programów) trudno je rozwiązać. Brakuje mi zatem jakiegoś podsumowania praktycznego (oszacowania) w jaki inżynierski sposób określić: podatność łączników, udział poszczególnych gałęzi w przenoszeniu siły osiowej i ostatecznie nośność tego typu pręta bliskogałęziowego. Wystarczyłaby tylko pewna próba prostego przybliżenia (prosty wzór) lub oszacowanie zakresu.

Trzecia uwaga ma charakter formalny. Praca doktorska powinna zawierać w zasadzie pewną tezę wstępną, która na podstawie uzyskanych rezultatów zostaje udowodniona, potwierdzona. Cel pracy niekoniecznie jest tezą. Wydaje mi się, że w recenzowanej pracy można było sformułować bez trudu tezę lub nawet kilka tez.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa doktorska jest nowoczesnym podejściem do badań i nauki, gdyż stanowi powiązanie analizy teoretycznej i eksperymentu fizycznego. Autor zbudował modele analityczne dla pręta trójgałęziowego, którego gałęzie połączone są jednostronnymi łącznikami mechanicznymi. Przygotowane modele obejmowały przypadek pręta krępego z uwzględnieniem podatności łączników oraz pręta smukłego z uwzględnieniem imperfekcji (tj. wygięcia wstępnego i naprężeń rezidualnych), podatności łączników i wyboczenia w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach.

Dla potwierdzenia poprawności przyjętych założeń i danych oraz wykonanych analiz teoretycznych, przeprowadzono obszerny i precyzyjny eksperyment fizyczny na dużych modelach w skali technicznej. Całość wykonanych prac świadczy o sumienności, dokładności, solidności, rzetelności i dojrzałości doktoranta jako badacza i naukowca.

Zaproponowane rozwiązania mogą stanowić istotny etap prac związanych z ewentualnym wykreowaniem oryginalnego konkurencyjnego krajowego systemu konstrukcyjnego opartego o stalowe elementy zinnogięte o przekrojach otwartych i zamkniętych.

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę "O tytule i stopniach naukowych" z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. Ust. nr 65) i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Kamila Słowińskiego do publicznej obrony pracy.



Kamil Słowiński