



Dr hab. inż. Marek Piekarczyk
Profesor nadzwyczajny w Politechnice Krakowskiej
Wydział Inżynierii Lądowej
Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych
Katedra Konstrukcji Metalowych
Ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Kraków, 30.07.2013

R e c e n z j a

rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Słowińskiego p t.: „Badanie nośności ściskanych osiowo elementów bliskogałęziowych z podatnymi połączeniami”

1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Słowińskiego pod tytułem podanym wyżej, której promotorem jest dr hab. inż. Walter Wuwer, prof. Politechniki Śląskiej opracowano na prośbę Pana Dziekana i Rady Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej z dn. 3 lipca 2013 r.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa napisana jest w języku polskim; obejmuje 165 stron tekstu w tym 150 stron części zasadniczej pracy z 105 rysunkami i 13 tablicami oraz 2 załączniki o łącznej objętości 15 stron. Część zasadnicza podzielona jest na 5 rozdziałów i zaopatrzona w spis literatury, wykaz ważniejszych oznaczeń oraz streszczenie w języku polskim.

We wprowadzeniu wskazano, że rozwój lekkich konstrukcji nośnych w obszarze budownictwa stalowego jest pochodną ogólnej tendencji wynikającej z postępu technicznego i spełnienia postulatów tzw. budownictwa zrównoważonego przyjaznego środowisku naturalnemu.

Stwierdzono, że brakuje obecnie skutecznych i sprawdzonych rozwiązań konstrukcyjnych w zakresie projektowania budynków w szczególności halowych z elementów prętowych z kształtowników giętych z blach na zimno łączonych za pomocą łączników mechanicznych i pokazano możliwości uzyskania takich rozwiązań przy zastosowaniu innowacyjnego systemu łączników jednostronnych typu BOM na przykładzie lekkiej kratownicy. Wskazano także możliwości dokonywania wzmocnień tego typu kratownic bez potrzeby ingerencji w konstrukcje istniejących już węzłów. Podniesiono brak w normach krajowych i zagranicznych stosownych przepisów w zakresie wyznaczania nośności i sztywności złożonych prętów blisko-gałęziowych.

Punkt drugi wprowadzenia zatytułowany : „Przegląd literatury” przynosi de facto rozpoznanie stanu wiedzy w zakresie racjonalnego kształtowania lekkich obiektów o konstrukcji stalowej w oparciu o wybrane przez Autora przykłady zgrupowane w trzech obszarach, a dotyczące :

- optymalizacji przekrojów prętów jednogałęziowych,
- zasad kształtowania prętów o przekrojach złożonych,
- wykonywania połączeń montażowych.

W zakresie optymalizacyjnym ograniczono się do wskazania przykładów prętów ściskanych, także wykonanych ze stali o zwiększonej odporności na korozję.

W odniesieniu do zasad kształtowania prętów o przekrojach złożonych wskazano tutaj przykłady przekrojów ceowych lub typu sigma pół-zamkniętych, połączonych wzajemnie środkami za pomocą wkrętów samo-wiercących lub samogwintujących (przebadane przy ściskaniu) lub quasi – zamkniętych np. zetowych (łączonych za pomocą przekładki o przekroju zamkniętym) (przebadane przy ściskaniu) i zamkniętych z 2 kształtowników sigma (badanych przy ściskaniu).

Wspomniano tu także o możliwości zastosowania spawania celem uzyskania przekrojów zamkniętych z ceowników i kątowników, a także dokonywania wzmocnień głównie elementów rurowych przez dopasowanie do ich bocznych powierzchni kątowników lub ceowników. W opinii Autora zabiegi takie są jednak rzadkie z uwagi na ich dużą pracochłonność i stosowane tylko z uwagi na niemożność wykorzystania standardowych łączników śrubowych w przypadku elementów o przekrojach zamkniętych. Autor powołał tu także alternatywę, jaką są wzmocnienia dokonywane z użyciem taśm lub mat kompozytowych, która jednak ma ograniczenia w postaci wysokich kosztów.

W kolejności opisano technologię wykonywania połączeń montażowych lekkich konstrukcji metalowych dla wybranych systemów określonych z uwagi na rodzaj zastosowanych łączników, poczynając od standardowych łączników śrubowych najczęściej wykorzystywanych w prętach o przekrojach otwartych oraz dwuskładnikowych wstępnie sprężanych łączników typu HUCK – FIT , przez wkręty samo-wiercące i samogwintujące stosowane dla uzyskania elementów złożonych i przekrojów zamkniętych, kończąc na innowacyjnych systemach łączników jednostronnych tj. śrub pasowanych i nitów typu MAGNA – LOK i innych jak AJAX ONESIDE, ULTRA TWIST, HOLLO – BOLT a w szczególności sworzni typu BOM (ang. Blind Oversize Mechanically Locked), pozwalających na uzyskanie jednociętych połączeń zakładkowych. Zachowanie się tych ostatnich w takich złączach zostało przez Autora opisane na podstawie wcześniej wykonanych badań na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej przez W. Wuwera i S. Świerczyń. Na zakończenie wspomniano także o innych systemach tzw. niestandardowych, a więc np. połączeniach wciskanych, kołnierzowych typu FLOWDRILL.

W podsumowaniu tego rozdziału Autor wskazuje na duży potencjał systemu konstrukcyjnego o racjonalnie ukształtowanych złączach elementów prętowych (także o przekrojach zamkniętych), w którym wykorzystuje się szybki i łatwy montaż z użyciem łączników jednostronnych.

W drugim rozdziale Autor przedstawia cel pracy, jakim jest opisanie zachowania się złożonego elementu blisko-gałęziowego o trzech współpracujących gałęziach (jednej zamkniętej i dwóch otwartych), połączonych zakładkowo za pomocą sworzni jednostronnych typu BOM. Opis ten zakończony stworzeniem analitycznego modelu matematycznego z uwzględnieniem imperfekcji „geometrycznych i technologicznych” po weryfikacji doświadczalnej ma służyć jako narzędzie do projektowania cienkościennych elementów prętowych o wyżej zdefiniowanej geometrii.

W zakresie pracy leżą w szczególności badania doświadczalne ściskanych osiowo, krępych prętów trójgałęziowych z pominięciem wybożenia (3 modeli) i badania doświadczalne ściskanych osiowo trójgałęziowych prętów smukłych z uwzględnieniem wybożenia (5 modeli w skali naturalnej).

Trzeci rozdział pracy poświęcony jest opisowi badań złożonych elementów krępych. Celem tych badań (zarówno teoretycznych jak i doświadczalnych) było ustalenie funkcji rozdziału siły osiowej w pręcie złożonym pomiędzy pasy zewnętrzne i gałąź środkową. Dla realizacji tego celu dobrano tak warunki geometryczne w tym liczbę sworzni BOM, aby wykluczyć efekty niestateczności przy ściskaniu.

Autor podaje założenia modelu analitycznego dla zaproponowanego rozwiązania i samo rozwiązanie zagadnienia wyznaczenia sił tnących w połączeniach ścianek gałęzi

pod działaniem siły ściskającej, co prowadzić ma do ustalenia rozdziału siły osiowej na poszczególne gałęzie a w kolejności wyznaczenia „stopnia współpracy” 3 gałęzi i wyteżenia pręta jako całości. Przyjęto idealny (nie zimperfekowany) model pręta złożonego osiowo-ściskanego podpartego przegubowo w węzłach podporowych z wykorzystaniem symetrii pręta po jego długości.

Autor podaje w oparciu o wcześniej wyprowadzoną na podstawie badań W. Wuwera i S. Świerczyny wartość siły tnącej w funkcji poślizgu w osi pojedynczego sworznia BOM układ równań pozwalający wyznaczyć poszukiwane wartości sił tnących w połączeniach gałęzi. Pełny opis tego rozwiązania podano w załączniku Z1 pracy.

W kolejności następuje opis odpowiednich badań doświadczalnych 3 elementów próbnych w skali naturalnej ze stali S235. Elementy zostały połączone technologią BOM przez doświadczonego montażystę. Ustawiono je na odpowiednio dobranym stanowisku badawczym w maszynie wytrzymałościowej z zastosowaniem głowic stwarzających warunki podparcia przegubowego na obu końcach.

W badaniach mierzono przemieszczenia między łączonymi ściankami, skrócenie pręta jako całości, odkształcenie w ściankach rury wewnętrznej, poziome strzałki ugięcia. Procedurę obciążenia elementów oparto na wytycznych ECCS, ale zastosowano skokowe a nie ciągłe przyrosty sił, co pozostaje w zgodzie z zaleceniami podanymi w polskiej wersji normy europejskiej w zakresie kształtowników i blach profilowanych na zimno. Próbę kończono na poziomie maksymalnej siły ściskającej wyznaczającej nośność elementu. Brak przemieszczeń poziomych wykazał poprawność założeń, co do sposobu zniszczenia elementów bez wyboczenia.

Autor dokonuje zestawienia i analizy wyników badań doświadczalnych i obliczeń teoretycznych przeprowadzonych dla wspomnianego wyżej modelu matematycznego. W szczególności pokazano rozdział siły osiowej na współpracujące gałęzie w kolejnych odcinkach ściskanego elementu o złożonym przekroju na podstawie wyników tensometrycznych pomiarów odkształceń w tych odcinkach w elemencie Bg-2 w konfrontacji z obliczonym teoretycznie poziomem współpracy tych elementów na podstawie stosunku ich sztywności, ale przy założeniu połączeń nieprzesuwnych. Dokonano także porównania wielkości rozdziału siły obliczonych na podstawie badań eksperymentalnych jak wyżej z wynikami otrzymanymi z rozwiązania analitycznego wg przyjętego modelu matematycznego dla różnych poziomów obciążenia od 100 kN do wartości granicznej 767,03 kN.

Zauważono stosunkowo słabą zgodność wyników w zakresie małych wartości obciążeń, ulegającą polepszeniu w zakresie większego obciążenia. Tłumaczy się to nieuwzględnieniem w modelu analitycznym fazy dużych sztywności początkowych złączy. Fazy pracy złączy przedstawiono na przykładzie elementu Bg-2 na płaszczyźnie: siła tnąca w pojedynczym łączniku – wzajemne przemieszczenie ścianek. W ogólności po uśrednieniu wyników dla wszystkich 3 elementów uzyskano dobrą zgodność rozdziału sił w przenoszeniu obciążeń granicznych w modelu analitycznym i doświadczalnym. Pokazano także uzyskany w doświadczeniu wykres zależności między obciążeniem pojedynczego sworznia a przemieszczeniem całkowitym zachodzącym w jego osi pomiędzy łączonymi ściankami. Zestawiono także tabelarycznie uzyskane stopnie wyteżenia sworzni w poszczególnych elementach pozostające na poziomie od 31 do 41% nośności obliczeniowej wyznaczonej wg kryterium wzajemnych deformacji ścianek zgodnie z zaleceniami ECCS oraz w dość dobrej zgodności z modelem analitycznym (39%).

W podsumowaniu tego rozdziału stwierdzono poprawność zaproponowanego modelu teoretycznego w konfrontacji z wynikami badań doświadczalnych oraz racjonalność zastosowania przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego.

Czwarty rozdział pracy zawiera opis i wyniki badań elementów złożonych blisko-gałęziowych tym razem smukłych, których celem było określenie nośności przy

ściskaniu osiowym ale z uwzględnieniem utraty ich stateczności ogólnej w warunkach początkowej imperfekcji – wstępnej krzywizny. Kształt przekroju poprzecznego pręta zmieniono w stosunku do przyjętego poprzednio i opisanego w rozdziale 3 w tym kierunku, że zasadniczym jego elementem stała się rura prostokątna z kształtownika walcowanego na gorąco a składnikami pomocniczymi dwa ceowniki gięte na zimno połączone środnikami z rurą jak poprzednio łącznikami typu BOM w liczbie 8 po długości pręta (3200 mm) z każdej strony; całość ze stali S355.

Podobnie jak w rozdziale poprzednim podano opis założeń i podstawowych zależności analitycznych modelu matematycznego prowadzących do wyznaczenia rozkładu sił wewnętrznych w przekroju oraz opisanego stanu odkształceń i przemieszczeń w gałęziach pręta złożonego oraz ich stykach.

Model analityczny uwzględnia imperfekcję geometryczną (wstępną krzywiznę) oraz imperfekcję strukturalną w postaci założonego pola naprężeń własnych membranowych w przekroju rury środkowej przyjętych na podstawie studiów literaturowych. Zjawisko wyboczenia pręta analizowane jest w sposób charakterystyczny dla tradycyjnych rozwiązań inżynierskich tj. osobno w płaszczyźnie przecinającej wszystkie gałęzie przekroju i osobno w płaszczyźnie do niej prostopadłej. Przy wyboczeniu w płaszczyźnie przecinającej wszystkie gałęzie przyjęto założenie o jednakowych krzywiznach wszystkich gałęzi pręta w całej historii obciążenia w efekcie zastosowania styków odpowiednio gęsto. Użyto tu metodę zastępczej sztywności pręta złożonego na odcinku między łącznikami dla określenia funkcji ugięcia (wygięcia) pręta złożonego jako całości.

Pokazano rozwiązania pozwalające wyznaczyć wartości sił tnących w połączeniach gałęzi z wykorzystaniem zależności opisujących poślizgi w złączach, określone na podstawie wcześniejszych badań W. Wuwera. Pełną postać rozwiązania dla rozważanego i przebadanego doświadczalnie pręta przedstawiono w załączniku Z 2.1 pracy.

W przypadku wyboczenia w płaszczyźnie nie przecinającej gałęzi pomocniczych w równaniach momentów doginających pominięto wpływ poślizgów w złączach jako nieistotnych i uwzględniono różnice we wzajemnych przemieszczeniach gałęzi głównej i wspomagających na kierunku osi prostopadłej do wspólnej osi przecinającej przekrój. Wprowadzono liniowe przybliżenie dla zależności poślizg w złączu – siła tnąca w złączu dla uproszczenia rozwiązania, co jest możliwe przy niewielkich wartościach tych sił, jakich się tu należy spodziewać. Pełną nieliniową postać tego rozwiązania podano w załączniku Z 2.2.

Przeprowadzono badania materiałowe dla wyznaczenia cech mechanicznych stosowanych elementów rurowych i ceowych w warunkach tzw. małej próby.

Dla określenia nośności i sztywności 1- ciętych połączeń zakładkowych łącznikami typu BOM wykonano badanie wytrzymałościowe 6 elementów próbnych 3 gałęziowych skonstruowanych na podstawie zaleceń literaturowych a w szczególności wytycznych ECCS i poddanych rozciąganiu osiowemu. Przed badaniem stwierdzono braki wzajemnego przylegania gałęzi w miejscach złączy i owalizację części otworów nawet przekraczającą dopuszczalne tolerancje. W badaniu w maszynie wytrzymałościowej zachowano procedurę podaną w normie europejskiej w tym zakresie z tą różnicą, że obciążenie przykładano skokowo a nie w sposób ciągły z uwagi na ograniczenia sprzętowe.

Stwierdzono podobieństwo przebiegu ścieżek równowagi między siłą rozciągającą a przemieszczeniem w złączu dla wszystkich złączy badanych i nieznaczny rozrzut wyników. Wyodrębniono sprężysty, sprężysto – plastyczny i plastyczny zakresy pracy połączeń. Stwierdzono porównywalność sztywności połączeń po stabilizacji łączników w złączach w sprężystej fazie pracy. Na podstawie uzyskanych ścieżek równowagi

statycznej określono oryginalne zależności między obciążeniem pojedynczego łącznika a wzajemnym przemieszczeniem łączonych ścianek.

Nośność obliczeniową połączenia BOM na docisk dla pojedynczego łącznika ustalono wg zaleceń ECCS w zależności od pomierzonej wartości nośności i współczynnika dopasowania uzyskanego na podstawie pomierzonych cech geometrycznych i wytrzymałościowych elementów złącza.

Określono następnie analityczną krzywą badanej zależności : siła ścinająca złącze – wzajemne przemieszczenie ścianek.

Ostatecznie przedstawiono zasadnicze badania smukłych elementów blisko-gałęziowych w liczbie 5 z zakładanych 6, która i tak wyczerpuje minimum normowe w tym zakresie. Dokonano inwentaryzacji elementów próbnych przed badaniem w zakresie cech geometrycznych przekroju poprzecznego i stwierdzono zgodność z normami odbiorowymi w zakresie tolerancji wykonawczych. Przy wierceniu otworów dla złączy w dwóch przypadkach nie udało się takich tolerancji dotrzymać.

Autor przedstawił w tym miejscu szczegóły montażu gałęzi elementów do badań, który został wykonany przez wykwalifikowanego pracownika. Stwierdzono poprawność wykonanych połączeń.

Przebadano 5 elementów na stanowisku badawczym, którego opis przynosi kolejny punkt tego rozdziału. W trakcie badań dokonywano precyzyjnego pomiaru siły ściskającej, ugięć poziomych w płaszczyznach obu głównych osi bezwładności przekroju poprzecznego za pomocą czujników indukcyjnych i dodatkowo dla kontroli geodezyjnie. Rejestrowano tensometrycznie odkształcenia w ściankach pręta głównego i wzajemne przemieszczenia ścianek gałęzi oraz skrócenie elementów na podporach. Z uwagi na możliwości techniczne siła była zwiększana skokowo a nie w sposób ciągły. Jako kryterium stanu granicznego nośności przyjęto minimum spośród sił towarzyszących :

- początkowi uplastycznienia włókien,
- sprężystemu wyboczeniu przekroju którejkolwiek gałęzi lub całości pręta,
- przekroczeniu nośności obliczeniowej dowolnego połączenia.

W wyniku doświadczeń otrzymano :

- ścieżki równowagi na płaszczyźnie : siła ściskająca – ugięcie poziome w płaszczyźnie wyznaczonej przez oś wspólną gałęzi przekroju pręta w połowie jego wysokości,
- ścieżki równowagi na płaszczyźnie : siła ściskająca – ugięcie poziome w płaszczyźnie wyznaczonej przez drugą oś główną przekroju w połowie jego wysokości.

Zniszczenie wszystkich próbek miało miejsce skutkiem utraty stateczności ogólnej w płaszczyźnie wyznaczonej przez oś wspólną gałęzi przekroju pręta głównie w zakresie sprężystym.

Dla poszczególnych prętów wyznaczono poziomy obciążenia, które inicjują początek uplastycznienia ścianek gałęzi rurowej stwierdzone w badaniach doświadczalnych (tensometrycznie) i odniesiono do obciążeń granicznych, od których są one tylko nieznacznie mniejsze.

Ustalono następnie rozdział siły osiowej na poszczególne gałęzie poprzez ustalenie rozdziału całkowitej siły tnącej w złączach i wyteżenia tych połączeń w odniesieniu do ich nośności obliczeniowych.

W kolejności przeanalizowano czynniki wpływające na nośność elementów. Zwrócono uwagę na duże rozrzuty nośności dla 5 elementów i dominację ugięcia poziomego w płaszczyźnie wyboczenia. Wyznaczono nośności obliczeniowe elementów wg zaleceń eurokodów i porównano je z nośnością doświadczalną wyznaczoną jako minimum dla przyjętych kryteriów granicznych.

Porównano również nośności doświadczalne z wartościami wyznaczonymi dla zaproponowanego modelu teoretycznego (z uwzględnieniem pól naprężeń własnych) w dwóch płaszczyznach wybożenia dla 4 wartości krzywizn wstępnych tj. $L/150$, $L/250$, $L/500$ i $L/1000$ a dla wybożenia w płaszczyźnie mniejszej sztywności decydującej o nośności dla dalszych dwóch amplitud krzywizn początkowych : $L/3000$ i $L/e6$, które dały najlepsze przybliżenie nośności z badań doświadczalnych.

Stwierdzono skuteczność wzmocnienia zasadniczego elementu rurowego za pomocą ceowników giętych. W konkluzji stwierdzono ponadto, że zastosowanie w obliczeniach wg modelu teoretycznego wstępnej krzywizny łukowej o amplitudzie $L/450$ przy uwzględnieniu stanu naprężeń własnych w przekroju rurowym pozwala w zadowalający sposób określić nośność obliczeniową badanych prętów złożonych. Podobny efekt daje zwiększenie amplitudy do $L/250$ (stosowanej w eurokodzie) bez uwzględnienia naprężeń własnych.

W podsumowaniu tego rozdziału Autor wskazuje na dużą skuteczność zastosowania przyjętego sposobu wzmocniania elementów ściskanych osiowo o przekrojach zamkniętych nawet o 70 % ich pierwotnej nośności.

Rozdział 5 pracy tj. zakończenie przynosi podsumowanie jej rezultatów, wśród których autor wskazuje opracowane dwa modele analityczne dla prętów krępych i wiotkich i ich doświadczalną weryfikację wraz z oceną wiarygodności wyników eksperymentalnych, a przez to osiągnięcie zakładanego celu opiniowanej pracy, jaką było wskazanie efektywnego systemu konstrukcyjnego dla lekkich elementów blisko-gałęziowych. Podano tutaj także przewidywane kierunki dalszych badań, w szczególności w celu zmniejszenia niepewności statystycznej badań przez użycie większej liczby elementów badanych, ale także opracowanie modelu numerycznego z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

3. Ocena rozprawy i uzyskanych wyników naukowych

Przedstawiona do oceny praca doktorska jest oryginalnym dziełem w zakresie określonym w jej tytule, tj. badań (doświadczalnych i studiów analitycznych – uzupełnienie recenzenta) nośności ściskanych osiowo elementów blisko-gałęziowych z podatnymi połączeniami (typu BOM – uzupełnienie recenzenta).

Autor rozprawy określił jej cel, którym w ogólności było zaproponowanie nowego rozwiązania konstrukcyjnego w zakresie projektowania budynków w szczególności halowych z elementów prętowych z kształtowników giętych z blach na zimno z połączeniami sworzniowymi jednostronnymi. Dla osiągnięcia tego celu wybrano system sworzni BOM łączących złożone elementy blisko-gałęziowe o trzech współpracujących gałęziach – jednej zamkniętej i dwóch otwartych. W efekcie przeprowadzonych studiów analitycznych a w szczególności badań doświadczalnych trzech modeli słupów krępych oraz pięciu modeli słupów wiotkich w skali naturalnej wykazano poprawność zaproponowanych modeli teoretycznych, pozwalających na oszacowanie nośności tych słupów oraz racjonalność zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego, które może być stosowane skutecznie także przy projektowaniu wzmocnień istniejących ściskanych elementów rurowych.

Istotna jest także konkluzja z badań w zakresie zgodności zaproponowanej wielkości wstępnej strzałki wygięcia zimperfekowanych słupów ściskanych tego typu z wytycznymi normy europejskiej dla poprawności oszacowania ich nośności.

Do oryginalnych elementów pracy należy zaliczyć:

- opracowanie analitycznych modeli matematycznych służących do wyznaczania nośności osiowo ściskanych słupów o przekroju trójgałęziowym z gałęziami łączonymi sworzniami typu BOM w przypadku elementów krępych nie ulegających wybożeniu i elementów wiotkich tracących stateczność ogólną,

- badania doświadczalne dwóch serii modeli w skali naturalnej (razem 8 modeli) dla weryfikacji przedstawionych metod analitycznych oceny nośności słupów tego typu,
- a także:
- pomocnicze badania 6 elementów próbnych 3 gałęziowych poddanych osiowemu rozciąganiu celem określenia nośności i sztywności jednociętych połączeń zakładkowych łącznikami typu BOM,
 - określenie na podstawie tych badań nowych zależności między obciążeniem ścinającym pojedynczego łącznika a wzajemnym przemieszczeniem łączonych ścianek.

Wymienione wyżej osiągnięcia poparte są ogólną wiedzą teoretyczną Autora rozprawy w dziedzinie konstrukcji stalowych, w szczególności kształtowania i optymalizacji przekrojów oraz wykonywania połączeń. Doktorant wykazał się dużą wnikliwością i dobrymi umiejętnościami prowadzenia pracy naukowej z wykorzystaniem zaawansowanego aparatu matematycznego a także umiejętnościami praktycznymi w zakresie przeprowadzania badań doświadczalnych.

4. Uwagi krytyczne

a) W warstwie merytorycznej rozprawy:

1. We wprowadzeniu w punkcie 1.1 „Geneza tematu” lub 1.2 „Przegląd literatury” pominięto opisy ważnych w opinii recenzenta rozwiązań systemowych w zakresie wykorzystania kształtowników giętych z blach na zimno w konstrukcjach nośnych budynków także halowych, takich jak: Filigran, Metsec, SADEF, Hoesch, Sunday i innych, które można znaleźć m. in. w następujących pozycjach:

- [1] Bródka J., Kozłowski A. (red.): Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych, Tom 1 (2009) i Tom 2 (2013), Polskie Wydawnictwo Techniczne,
- [2] Piekarczyk M., Pięciórak E.: O zastosowaniach kształtowników profilowanych na zimno jako podstawowych elementach nośnych w halach, Inżynieria i Budownictwo, Nr 12/2005, str. 695-698,
- [3] Niedzielski T. (red.): Sunday system TM, Light Gauge Steel Construction, AmTech LLC. 2006 (także www.amtech.com.pl),
- [4] Filigran Trägersysteme – www.filigran.de,
- [5] Pasternak H., Kubieniec G.: Leichte Fachwerktraeger – Fertigungstechnologie und Tragverhalten, Bauingenieur 85 (2010), s. 412-420.

2. W odniesieniu do prezentacji wyników badań prętów przedstawionej w rozdziale 3, tj. prętów krępych nie podano w punktach 3.5.2 (Rozdział siły osiowej na współpracujące gałęzie) i 3.5.3 (Wyteżenie połączeń) pełnych danych dla elementów Bg-1 i Bg-3, odsyłając czytelnika do prac przyczynkowych wykazanych w literaturze (np. str. 63). Wobec szczupłości tego typu danych doświadczalnych właśnie w pracy doktorskiej należy je wszystkie zestawić, aby dać możliwość ewentualnej weryfikacji w przyszłości przez innych badaczy.

Podobnie, szkoda że Autor nie przywołał w pkt. 3.5.2 opisującym rozbieżności między krzywą analityczną a doświadczalną w analizie pracy złącza modyfikacji dla niskich poziomów obciążeń opracowanej i opublikowanej przez Niego we współautorstwie z Promotorem, a jedynie wskazał to opracowanie (str. 62 w.4g.).

W ogólności należało by rozważyć odrzucenie wyników próby Bg-3, wobec nie osiągnięcia w tej próbie wartości nośności normowej $N_{b, Rd, 2U}$, która określona jest przecież z odpowiednim marginesem bezpieczeństwa.

3. W odniesieniu do analizy teoretycznej zagadnienia zachowania się pod obciążeniem ściskanego słupa o wiotkim przekroju (pkt. 4 pracy) należy w krytyce podnieść fakt, że prezentowane podejście do opisu zjawiska wyboczenia jest tradycyjne i „inżynierskie”. Przeprowadzono bowiem rozumowanie charakterystyczne dla teorii bifurkacyjnej idealnego pręta i to pracującego osobno w dwóch płaszczyznach, jak ma to miejsce do tej pory w ujęciach normowych obliczeń nośności. Z tego punktu widzenia jest to zrozumiałe, ale w rzeczywistości nie można mówić o nośnościach pręta osobno w jednej czy drugiej płaszczyźnie. Nośność jest dla pręta wielkością integralną i niezależną od tego, w której płaszczyźnie ma miejsce wyboczenie. Należy tu podnieść, że w rzeczywistości, a więc w przypadku wystąpienia imperfekcji krzywiznowej zjawisko wyboczenia giętnego jest pojęciem czysto teoretycznym. W rzeczywistości ma miejsce jedynie doginanie pręta wstępnie już wyboczonego do osiągnięcia obciążenia granicznego odpowiadającego nośności pręta. W tym kontekście należało by zwrócić uwagę czytelnika przy lekturze punktu 4.6.5 na to, że wykresy ugięć poziomych pokazane na ścieżkach równowagi (rys. 4.48, 4.49, 4.50) w połowie wysokości prętów zaczynają się od zera a nie od wygięcia wstępnego, dlatego że pomierzone wartości były mniejsze od zakładanego błędu pomiarowego, co podano w innym miejscu. Nie usprawiedliwia to jednak stanu rzeczy na rys. 4.53, gdzie przedstawiono podane ścieżki równowagi wg modelu analitycznego ale dla przyjmowanych z założenia większych krzywizn (od $L/1000$ do $L/150$ a więc od 3,2 mm do 21,3 mm), a wyniki podano od zerowych przemieszczeń. Może chodzi tu o przyrosty wygięć od stanu początkowego, co jednak i tak zmieniało by podane krzywe.

Przy omówieniu zagadnienia doboru przekroju należało odnieść się wyraźnie do problemu utraty stateczności miejscowej przez ścianki przekroju i podnieść, że tak dobrano geometrię ścianek, aby uniknąć interakcji zjawisk niestateczności lokalnej i ogólnej. Może należało podać obliczenia klas przekrojów poszczególnych ścianek. Brakuje takiego obliczenia.

Jako kryterium stanu granicznego nośności przyjęto sprężyste wyboczenie pręta albo osiągnięcie kresu nośności w połączeniu ścianek gałęzi związanego z początkiem ich uplastycznienia w pobliżu złącza, a więc zasadniczo kryteria dla rozwiązania sprężystego. Opis zjawisk występujących w badanych elementach zimperfekowanych jest w rzeczywistości bardziej złożony, bo dochodzi do wzajemnej redystrybucji pól naprężeń w gałęziach, a relacje obciążenia – odkształcenia i odkształcenia – przemieszczenia mają charakter nieliniowy i pozasprężyste. Szkoda, że Autor nie zbudował modelu odpowiedniego dla metody elementów skończonych i nie przeprowadził symulacji zachowanie się takiego modelu pod obciążeniem. Wyznaczenie nośności ma wtedy charakter jednoznaczny, nie ma znaczenia kierunek i płaszczyzna wyboczenia. Trudności w budowie takiego modelu stwarza oczywiście złącze, ale ściśle modelowanie jego zachowania się można zastąpić odpowiednimi warunkami zszycia. Przyjęty w pracy model analityczny jest przecież także bardzo skomplikowany jak na potrzeby inżynierskie, bo przy jego analizie wymaga się rozwiązania układu 29 równań nieliniowych, do czego potrzebny jest program obliczeniowy np. Wolfram Mathematica 7, którego użył Autor.

Słusznie zatem podniesiono w zakończeniu pracy zamiar wykorzystania w przyszłości metody elementów skończonych do analizy opisywanych zagadnień.

4. We wstępnych badaniach własności mechanicznych materiału wiotkich elementów próbnych gałęzi rurowych i ceowych (pkt. 4.4 pracy) użyto po 4 próbki każdego z materiałów i na tej podstawie określono wartości średnie badanych cech. Dla zmniejszenia statystycznej niepewności badań powinno się użyć większą liczbę próbek.

b) W warstwie redakcyjnej:

1. Praca zredagowana jest na ogół starannie. Należało by się wszakże zastanowić nad zastąpieniem w tytule słowa „Badanie” przez słowo „Ocena”, co oddaje lepiej treść pracy, bowiem opisuje ona nie same badania, ale także prowadzi do celu, jakim jest ocena nośności przedmiotowych elementów konstrukcyjnych. Podobnie tytuł punktu drugiego „Przegląd literatury” powinno się zastąpić przez „Rozpoznanie stanu wiedzy”.

Opisy na rysunkach 1.1, 1.11, 1.15, 1.16, 1.18, 1.19, 1.29 podane są w języku angielskim, a powinny być przetłumaczone na język polski.

Na rys. 1.4 w przekroju 2-2 element wspomagający ΔA jest jednogłęziowy, z czym kłóci się jego opis na str. 12 (w.1-5d.). Ten ostatni odnosi się tylko do przypadku pokazanego w przekroju 1-1 na tym rysunku.

W opisie rys. 1.5 brak jest źródła jego pochodzenia.

Na rys. 3.12 należało by wskazać, czy N_R oznacza wartość $N_{b,Rd,2U} = 712,8$ kN. W opisie pod tym rysunkiem pomyłono B_z z B_g .

Nie wszystkie podane na rys. 1.26 (str. 35) oznaczenia zostały w sposób jednoznaczny opisane w tekście omawiającym ten rysunek, np. brak jest opisu dla P_d , $P_{m,śr}$, zamiast S powinno być S_1 , nie podano, co to jest s , r_k – można by tu wskazać ewentualnie opis ze str. 51, ale i tak nie będzie on pełny.

Podając przykład połączenia omawianego na str. 38 (akapit 2g.) należało by dołączyć odpowiednią ilustrację dla lepszego zrozumienia opisu technicznego.

Na str. 48 (w.3g.) i str. 54 (w.9g.) użyto pojęcia „zamocowany przegubowo”, co jest kolokwializmem, poprawnie powinno się użyć sformułowania „podparty przegubowo”.

Na str. 52 należało by zaznaczyć np. w tytule Tablicy 3.1, że podano wartości średnie parametrów.

Na rys. 4.50 powinno się zdefiniować znaczniki – kółko i romb, które pomyłono. Zgodnie z opisem w pkt. 4.6.5.3 zamiast kółek powinien być romb i odwrotnie.

2. Występują nieliczne błędy językowe np.:

- str. 34 (w.16g.) brakuje „z”,
- str. 46 (w.12g.) „przeprowadzonych” powinno być z małego „p”,
- str. 47 (w.4g.) „przy towarzyszącym takiemu” (jest „takim”).

5. Końcowa ocena rozprawy

W oparciu o sformułowania zawarte w pkt.3 niniejszej recenzji stwierdzam, że przedmiotowa rozprawa spełnia warunki określone w art. 13 Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dn. 14.03.2003 r. i może stanowić podstawę do nadania mgr. inż. Kamilowi Słowińskiemu stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Proponuję dopuścić pracę do publicznej obrony.



M. Rehak