

dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. PG
Katedra Konstrukcji Metalowych
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
tel. 58 347 10 47
e-mail: piwicki@pg.edu.pl

Gdańsk, 29.06.2019

WPLYNĘŁO DNIA

03 -07- 2019

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Michała Piątkowskiego

pt. „Analiza nośności dźwigarów kratowych z imperfekcjami geometrycznymi”.

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej dr hab. inż. Wiesławy Głodkowskiej, prof. PK, z dnia 07.05.2019 i dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. Michała Piątkowskiego pt. „Analiza nośności dźwigarów kratowych z imperfekcjami geometrycznymi”, wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Joanny Jankowskiej-Sandberg, prof. PK.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa dotyczy badań wpływu wybranych, geometrycznych imperfekcji kratownic na obciążenie typowych tężników połączeniowych oraz wpływu tych imperfekcji na ogólną nośność i stateczność kratownicy. Uwzględniono imperfekcje geometryczne „z płaszczyzny” występujące w elementach składowych kratownicy, takich jak pas górny oraz dolny. Wyniki badań doświadczalnych zostały zweryfikowane odpowiednimi analizami numerycznymi wykonanymi przy użyciu programu komputerowego SOFiSTiK, bazującego na *Metodzie Elementów Skończonych*.

Przeprowadzono również numeryczne analizy parametryczne kratownic o wymiarach rzeczywistych, uwzględniając zarówno parametry geometryczne, jak również różne warianty obciążenia, różne układy imperfekcji lub schematy podparcia bocznego. Podczas badań doświadczalnych oraz analiz numerycznych rozważano układy jednoczesnych łukowych imperfekcji pasów o pewnej deterministycznie przyjętej wartości wychylenia, jak również pewne probabilistyczne układy imperfekcji.

Wykonane przez Autora badania doświadczalne i analizy numeryczne wykazały, że geometryczne imperfekcje ściskanego pasa dźwigara kratowego „z płaszczyzny” ustroju powodują powstanie dodatkowego obciążenia, przekazywanego na połaciowy tęcznik poprzeczny lecz obciążenie to ma nierównomierny rozkład, różniący się od zalecanego w normie PN-EN 1993-1-1:2006.

Rozprawa została napisana w języku polskim, liczy 141 stron formatu A4 i składa się z siedmiu numerowanych rozdziałów. Pracę uzupełniają streszczenia w języku polskim i w języku angielskim, wykaz literatury i załączniki. Praca zawiera 64 wzory, 85 rysunków, 22 tablic oraz 198 pozycji literatury w kolejności alfabetycznej, w tym 32 pozycje normowe. Rysunki i tablice są numerowane w ramach rozdziałów.

3. Tematyka i zakres rozprawy

Rozdział pierwszy obejmuje wstęp o objętości 6 stron zawierający wprowadzenie do tematyki badawczej. W rozdziale opisano na podstawie literatury zagadnienia niedokładności wykonania konstrukcji stalowych. Szczególną uwagę poświęcono niedokładnościom wykonania kratownic dachowych, które są projektowane do przenoszenia obciążeń w płaszczyźnie konstrukcji, natomiast są wrażliwe na różnego typu niedokładności tj. imperfekcje geometryczne stanowiące wychylenia z płaszczyzny kratownic. W rozdziale tym umieszczono wykaz zastosowanych symboli i oznaczeń.

W **rozdziale drugim** na 5 stronach zaprezentowano przedmiot, cel i zakres rozprawy oraz sformułowano tezę pracy. Główna teza pracy dotyczy wpływu imperfekcji pasa dźwigara kratowego na powstanie dodatkowego obciążenia, przekazywanego na połaciowy tęcznik poprzeczny. Stwierdzono, że obciążenie to ma nierównomierny rozkład, różniący się od zalecanego w normie PN-EN 1993-1-1:2006. W kolejnych punktach tezy podkreślono, że występujące w konstrukcji kratowej globalne i lokalne imperfekcje geometryczne pasów wpływają na rozkład i wartość obciążenia tęcznika oraz, że imperfekcje geometryczne mają wpływ na nośność graniczną i stateczność kratownicy. Dodano, że imperfekcja pasa rozciąganego również wpływa na nośność graniczną dźwigara kratowego.

W **rozdziale trzecim** (37 stron) omówiono aktualny stan wiedzy, przedstawiono studia literatury z zakresu projektowania konstrukcji z uwzględnieniem imperfekcji oraz klasyfikację imperfekcji zgodnie z normami stosowanymi w budownictwie. Opisano rys historyczny badań naukowych, dotyczących uwzględniania imperfekcji geometrycznych w konstrukcjach stalowych oraz ich wpływu na zachowanie się elementów konstrukcyjnych.

Rozdział czwarty (13 stron) poświęcono przedstawieniu nazewnictwa imperfekcji geometrycznych w kratownicach płaskich, wyznaczeniu normowego obciążenia zastępczego w badanej doświadczalnie kratownicy, jak również porównaniu metod teoretycznego wyznaczania obciążenia tężnika. W rozdziale tym, przedstawiono również, wykonane przed przystąpieniem do badań doświadczalnych, wstępne analizy teoretyczne i numeryczne dotyczące sprężystego obciążenia krytycznego modelu doświadczalnego w stanie *perfect*, ścieżki równowagi pasa ściskanego wraz z określeniem przybliżonego obciążenia granicznego.

Rozdział piąty zatytułowany „Badania doświadczalne” o objętości 35 stron zawiera opis stanowiska badawczego, aparatury pomiarowej, zastosowanych metod wykonywania pomiarów oraz wyniki tych pomiarów. W rozdziale tym przedstawiono konstrukcję oraz szczegóły techniczne stanowiska badawczego, jak również modele badawcze. Opisano metodykę prowadzenia poszczególnych etapów badań oraz pozyskiwania danych pomiarowych. Przedstawiono wprowadzone modyfikacje stanowiska badawczego, zastosowane analizy danych pomiarowych w zakresie badań statystycznych i porównania z wartościami dopuszczalnymi.

Rozdział szósty (26 stron) zawiera wyniki przeprowadzonych analizy numerycznych. Opisano w nim analizowane modele numeryczne stworzone na podstawie pomierzonej geometrii przekrojów oraz sprawdzonych doświadczalnie parametrach wytrzymałościowych materiału. Oprócz weryfikacji wyników doświadczalnych przeprowadzono analizy parametryczne kratownic "rzeczywistych", uwzględniając czynniki pominięte w badaniu doświadczalnym. W rozdziale tym określono również sztywność węzłów modelu badawczego oraz kratownicy "rzeczywistej". Obliczenia wykonano za pomocą programu SOFiSTiK 2016 oraz IDEA StatiCa.

Rozdział siódmy (6 stron) zawiera podsumowanie prowadzonych badań oraz ocenę uzyskanych wyników, wnioski oraz kierunki dalszych badań. Przedstawiono argumenty potwierdzające poprawność postawionych tez pracy doktorskiej.

Pracę uzupełniają streszczenia w języku polskim i w języku angielskim. Praca zawiera 198 pozycji literatury w kolejności alfabetycznej, w tym 32 pozycje normowe.

Szczegółowe wyniki pomiarów przedstawiono w 10 załącznikach. Załącznik pierwszy zawiera 40 protokołów pomiarów dokładności modeli doświadczalnych, załącznik drugi - wstępne imperfekcje geometryczne pasów, załącznik trzeci - świadectwo wzorcowania maszyny wytrzymałościowej, załącznik czwarty - pomiary pola powierzchni przekrojów profili rurowych. W załączniku piątym w czterech podrozdziałach przedstawiono pomiary

cech wytrzymałościowych stali prezentowane w nienumerowanych tabelach i na rysunkach. Załącznik szósty zawiera 10 tabel z pomiarami oddziaływania kratownicy z imperfekcjami na tężnik poprzeczny, załącznik siódmy - 24 tabele z wynikami badań stateczności dźwigara z imperfekcjami. W załączniku ósmym podano dokumentację warsztatową modelu badawczego, w załączniku dziewiątym - kod tekstowy programu SOFISTIK, a w dziesiątym - zestawienie wyników analiz parametrycznych w formie tabelarycznej (22 tabel) i graficznej (21 rysunków).

4. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy ważnego problemu inżynierskiego, jakim jest wpływ imperfekcji geometrycznych na nośność wybożeniową kratownic oraz na wyężenie tężnika połaciowego. W pracy wykonano badania doświadczalne, analizy numeryczne wybożenia kratownicy, przeprowadzono obliczenia obciążeń tężnika wg procedur normowych i procedur zaczerpniętych z literatury. Największym osiągnięciem są badania doświadczalne z dokładną i systematyczną analizą różnych imperfekcji. Połączenie wyżej wymienionych obszarów badawczych powoduje, że praca jest kompletna.

Analiza przepisów normowych stanu wiedzy na temat stateczności konstrukcji, problemu imperfekcji i badań w zakresie stateczności kratownic jest bardzo dokładna. Widać, że analizy imperfekcji geometrycznych w kratownicach, ich wpływ na nośność i stateczność tych układów a przede wszystkim na wyężenie tężnika połaciowego, przedstawione w pracy są osadzone w aktualnym nurcie badawczym.

Podjęte badania są aktualne i ważne z uwagi na to, że stosowane obecnie zaawansowane systemy obliczeniowe, które pozwalają na wykonywanie coraz bardziej złożonych obliczeń numerycznych, mogą w przyszłości umożliwić całkowite odejście od analiz uproszczonych lub normowych. Zawsze jednak podstawowym problemem będzie określenie imperfekcji lub ich kombinacji, które występują w konstrukcji rzeczywistej lub takich, które powodują najbardziej niekorzystne przypadki nośności konstrukcji. Analizy konstrukcji złożonej z uwzględnieniem wszystkich możliwych imperfekcji, ich wzajemnego układu oraz wpływu na zachowanie się konstrukcji jest sprawą trudną lub wręcz niemożliwą. Pojawia się potrzeba określenia miarodajnych imperfekcji. Ten problem powinien być więc tematem przepisów normowych. Badania imperfekcji są bardzo ważne, ponieważ dają podstawę do usystematyzowania niedokładności wykonania konstrukcji. Aspekt braku opisu imperfekcji w normach został dostrzeżony w recenzowanej pracy. Autor zwrócił uwagę na brak niektórych odchyłek montażowych kratownicy, na przykład tolerancji skrętnej w przepisach

normowych. Zdaniem Autora w aktualnej literaturze brakuje dostatecznych informacji na temat "kombinatoryki tych imperfekcji".

Zarówno obliczenia numeryczne, jak i badania doświadczalne potwierdzają słusność stawianej tezy dotyczącej wpływu imperfekcji pasa dźwigara kratowego na powstanie dodatkowego obciążenia, przekazywanego na połączeniowy tęcznik poprzeczny oraz że obciążenie to ma nierównomierny rozkład, różniący się od zalecanego w normie PN-EN 1993-1-1:2006.

Swoje zastrzeżenia Recenzent przedstawia w poniższym wykazie uwag krytycznych, pytań i wątpliwości:

1. Czy po przeprowadzonych badaniach Autor zaproponowałby konkretne zmiany w przepisach normowych dotyczących jakości wykonania kratownic. W pracy stwierdzono, że przepisy normowe dotyczące dokładności wykonania i montażu kratownic zawarte w normach są nieprecyzyjne lub niepełne, co utrudnia ich jednoznaczną interpretację. We wnioskach podano, że może występować skretna imperfekcja przekroju kratownicy, obliczana jako suma przeciwnych imperfekcji pasów wydzielonych lub imperfekcja pasa dolnego. Brakuje jednak bardziej ogólnych wniosków dotyczących imperfekcji lub ich kombinacji, które powinny być brane pod uwagę w analizie konstrukcji. Jakie układy imperfekcji lub ich kombinacje wynikają z analiz przeprowadzonych w pracy?
2. W praktyce projektowej nie wiadomo z góry, jakie będą imperfekcje, a więc należy założyć pewien poziom niedokładności wykonania i kształt imperfekcji. W programach analizy konstrukcji łatwo uwzględnić imperfekcje w postaci wyboczenia lub drgań własnych. Czy taki kształt imperfekcji może być stosowany?
3. W pracy stwierdzono, że przeprowadzona analiza numeryczna potwierdziła nierównomierny i znakozmienny rozkład obciążenia tęcznika oraz występowanie większych wartości węzłowego obciążenia tęcznika niż w przypadku analizy normowej. Z punktu widzenia projektanta ważne jest również to, jak opisane różnice obciążeń wpływają na końcowy projekt stężenia połączeniowego? W pracy brakuje porównania stężenia zaprojektowanego wg obecnych wzorów normowych z wynikami analiz doświadczalnych i numerycznych.

4. W badaniach analizowane były modele kratownic w skali „pólnaturalnej”. Jak odnieść wyniki tych badań do kratownic w skali naturalnej? Badane kratownice mają określone proporcje sztywności pasów do krzyżulców. Ważne byłoby zweryfikowanie tych badań na modelach kratownic, które mają geometrię proporcjonalną do rzeczywistych kratownic. Czy wnioski byłyby podobne? Jak odnieść rezultaty badań modeli opisanych w pracy do konstrukcji rzeczywistych dachów hal stalowych?
5. Proponowany w pracy podział imperfekcji geometrycznych w kratownicach:
 - a) lokalna wykrętowania,
 - b) lokalna pasa "w płaszczyźnie",
 - c) lokalna pasa "z płaszczyzny" - pomiędzy węzłami,
 - d) układy lokalnych imperfekcji pasów "z płaszczyzny" - pomiędzy punktami bocznego podparcia,
 - e) globalna pasa w płaszczyźnie,
 - f) układy globalnych imperfekcji pasów "z płaszczyzny",
 - g) globalna pasów wynikająca z imperfekcji styku montażowego,
 - h) globalna przechyłowa,
 - i) globalna skrętnajest bardzo skomplikowany. Jak zastosować go w praktyce projektowej?
6. W badaniach doświadczalnych niektóre imperfekcje uzyskano jako wymuszenie pod wpływem specjalnego układu obciążenia. Takie wymuszenia powodują wystąpienie dodatkowych naprężeń. Jaki to miało wpływ na końcową nośność wybożeniową kratownicy?
7. Obecnie w programach komputerowych często wykonuje się model przestrzenny całej konstrukcji, czyli oprócz dźwigarów kratowych pławii, słupów modelujemy również stężenia. Jak odnieść wyniki analiz przeprowadzonych w pracy do obliczeń przestrzennych hal? Czy powinno się robić modele uproszczone, czy też nie korzystać z wzorów dotyczących obciążenia stężeń a całość konstrukcji obliczać z jednego modelu? Jak w tym przypadku uwzględnić imperfekcje?
8. Jak zakładać w modelach przestrzennych dachów lub hal imperfekcje geometryczne z uwzględnieniem parametrów losowości? Nie wszystkie kratownice mają

jednakowe amplitudy imperfekcji. Niektóre mogą mieć również wygięcia w różnych kierunkach. Jak te elementy wpływają na wnioski dotyczące stabilizującego obciążenia zastępczego w analizie stężeń?

9. W przypadku obciążeń kratownicy skierowanych w górę pas dolny może się również wyboczyć. Jaki wpływ mają sztywności rotacyjne połączenia pasa górnego ze stężeniami w tym przypadku?
10. Teza postawiona w pracy: „Występujące w konstrukcji kratowej układy globalnych i lokalnych imperfekcji geometrycznych pasów wpływają na rozkład i wartość obciążenia tężnika” jest poprawna, ale wydaje się, że jest zbyt oczywista. Wydaje się, że wystarczyłaby teza opisana w pkt. 1.
11. W pracy użyto nieprecyzyjne sformułowanie: „wykonano szerokie analizy parametryczne kratownicy” (str. 12). Co to znaczy „szerokie analizy parametryczne”?

5. Wniosek końcowy

Recenzowana praca wpisuje się w aktualny nurt badawczy. Wnioski z przeprowadzonych analiz są bezpośrednio związane z przepisami normowymi, a więc istotne dla projektantów konstrukcji. Niezależnie od zamieszczonych uwag krytycznych lub dyskusyjnych należy stwierdzić, że rozprawa doktorska mgra inż. Michała Piątkowskiego zawiera istotne wartości poznawcze w zakresie badań doświadczalnych i analiz numerycznych nośności wyboczeniowej stalowych kratownic dachowych oraz analiz stężeń połączeniowych poprzecznych. Stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. z 2017, poz. 1789 ze zm.) i stawiam wniosek o dopuszczenie Pana mgra inż. Michała Piątkowskiego do jej publicznej obrony.



dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. PG