

dr hab. inż. Jarosław Górski, prof. nadz. PG
Katedra Mechaniki Budowli
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
tel. 058-347-11-80
e-mail: jgorski@pg.edu.pl

Gdańsk, 01.12.2017

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. **Katarzyny Kubickiej**

Ocena bezpieczeństwa pożarowego stalowych konstrukcji kratowych w ujęciu probabilistycznym

Probabilistic assessment of fire safety of steel trusses

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest pismo Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej prof. dr. hab. inż. Marka Iwańskiego, z dnia 27.10.2017 i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr. inż. **Katarzyny Kubickiej** pt. „**Ocena bezpieczeństwa pożarowego stalowych konstrukcji kratowych w ujęciu probabilistycznym**”, wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Urszuli Radoń, prof. PŚk oraz promotora pomocniczego dr inż. Urszuli Pawlak.

2. Podstawowe dane o pracy

Praca składa się z pięciu rozdziałów zakończonych spisem literatury oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim. Całość materiału przedstawiono na 216 stronach formatu B5. Praca zawiera 90 wzorów, 124 rysunki, 72 tabele oraz przytacza 229 pozycji literatury. Wzory, rysunki i tabele numerowane są w ramach rozdziałów. Rozprawa jest napisana czcionką 11 punktową w odstępie jednej linii.

3. Główne założenia i zakres pracy

Otwierające pracę **Wprowadzenie** (22 stron, 7 rysunków, 2 tabele) podzielono na trzy podrozdziały.

W **Rozdziale 1.1 (Przedmiot rozważań)** omówiono skutki pożarów w halach, salach gimnastycznych i innych obiektach. Rozdział ma charakter popularnonaukowy, z ciekawymi spostrzeżeniami opisanymi barwnym językiem. Ten fragment pracy bardzo dobrze wprowadza w tematykę podjętą w rozprawie.

Rozdział 1.2 to Przegląd literatury. Bibliografię omówiono przy zachowaniu logicznego porządku i właściwej kolejności, dzieląc ją na trzy grupy. Pierwsza z nich dotyczy tematyki pożarowej, druga niezawodności konstrukcji, a trzecia łączy obie te dziedziny. Wydaje się, że lepiej byłoby wprowadzić trzy odrębne podrozdziały, gdyż te fragmenty można łatwo wyróżnić w tekście.

W **Rozdziale 1.3** sformułowano cel oraz tezę pracy, a także wymieniono założenia związane z opisem zagadnień cieplnych, mechanicznych oraz probabilistycznych. Rozdział zamyka omówienie struktury pracy.

W **Rozdziale 2** (36 stron, 12 rysunków, 72 wzory, 12 tabel), zatytułowanym **Analiza pożarowa konstrukcji stalowych** w sposób encyklopedyczny przedstawiono definicje i dane stanowiące podstawę wykonanych obliczeń. W kolejnych rozdziałach omówiono klasy

zagrożenia ludzi i ognioodporności (2.1) oraz parametry termiczne (2.2.1) i mechaniczne (2.2.2) stali w podwyższonych temperaturach (2.2.3). Przedstawiono podstawowe zależności, np. zmianę modułu sprężystości lub granicy plastyczności, opracowane w różnych ośrodkach oraz porównano je z opisem umieszczonym w Eurokodzie. Omówiono czynne i bierne środki ochrony przeciwpożarowej (2.3). Umieszczono także wzory umożliwiające obliczenie nośności elementów rozciąganych i ściskanych pod wpływem temperatury (2.4).

Szczególną uwagę zwraca **Rozdział 2.2.4** zatytułowany „Zmodyfikowany algorytm MES w analizie pożarowej”, który omawia autorski algorytm przeprowadzonych obliczeń, a więc jest jednym z ważniejszych fragmentów pracy.

W **Rozdziale 2.5** przedstawiono zarys zastosowania metod probabilistycznych w projektowaniu konstrukcji z uwzględnieniem warunków pożarowych. Należy wyróżnić fragment rozdziału, w którym na podstawie wzorów i danych z literatury oszacowano minimalny wskaźnika niezawodności β dla konstrukcji znajdującej się w sytuacji pożarowej.

W **Rozdziale 3** zatytułowanym **Niezawodność konstrukcji stalowych** (20 stron, 15 rysunków, 41 wzory, 1 tabela), na podstawie podstawowej literatury tematu omówiono m.in.: prawdopodobieństwo awarii, niezawodność, rozkład normalny, poziomy oceny bezpieczeństwa, wskaźnik Hasofera-Linda, metody FORM i SORM, metodę Monte Carlo oraz analizę systemową.

Rozdział 4 zatytułowany **Wpływ opisu krzywych pożarowych na odpowiedź termiczną konstrukcji** (111 stron, 56 rysunków, 11 wzorów, 57 tabel) jest najważniejszym fragmentem pracy. Przedstawiono w nim przykłady analizy konstrukcji stalowych w warunkach pożarowych. W pierwszej części wykonano obliczenia dla kratownic o różnych schematach statycznych. Zbadano wpływ opisu krzywej pożarowej na odpowiedź termiczną nieizolowanej i izolowanej kratownicy (4.1), dodatkowo weryfikując rodzaj i grubość zastosowanych izolacji (4.2). Ponadto sprawdzono wpływ blokady swobodnych odkształceń termicznych na odpowiedź mechaniczną konstrukcji (4.3).

W **Rozdziałach 4.4 i 4.5** rozszerzono obliczenia kratownic statycznie wyznaczalnych (4.4) oraz niewyznaczalnych (4.5) o analizę niezawodnościową. Wykorzystano metody aproksymacyjno-symulacyjne i analizę systemową oraz dokonano porównania otrzymanych wyników.

W **Rozdziale 5** przedstawiono wnioski, wskazano elementy oryginalne pracy oraz określono kierunki dalszych badań.

Bardzo obszerna **Bibliografia** zawiera 229 pozycji, w tym doktoraty, specjalistyczne opracowania oraz wykorzystane normy i rozporządzenia.

4. Uwagi o pracy.

W pracy można wyróżnić trzy tematy: omówienie metod zapobiegania pożarom oraz skutecznej ochrony pożarowej konstrukcji, obliczenia związane z wpływem pożaru na konstrukcję przy wykorzystaniu normowych wzorów i danych oraz próbę oszacowania niepewności towarzyszącej uzyskanym wynikom. Dwa pierwsze elementy pracy mają raczej standardowy charakter, podczas gdy analiza niezawodnościowa zawiera elementy oryginalne.

W obliczeniach probabilistyczny zastosowano program komputerowy Numpress Explore wykorzystujący algorytmy FORM, SORM, Losowanie z funkcją ważności (Importance Sampling) oraz metodę Monte Carlo. Ponadto zaproponowano własną Analizę Systemową, opisującą kolejne fazy degradacji konstrukcji w trakcie trwania pożaru. Wyniki obliczeń z tych dwóch grup zasadniczo się różnią. Program Numpress Explore wymagał podania jawnej funkcji stanu granicznego i obliczenia wykonane za jego pomocą dotyczą konkretnego scenariusza zniszczenia, podczas gdy obliczenia systemowe analizują rzeczywistą pracę całej konstrukcji. Porównywanie tych dwóch metod może mieć jedynie informacyjny charakter. Wyniki uzyskane za pomocą programu są zbliżone do analizy niezawodności pojedynczych

prętów poddanych działaniu temperatury. Jest to szczególnie zauważalne w obliczeniach konstrukcji statycznie niewyznaczalnych.

W pracy nie podjęto próby wykorzystania np. metody Monte Carlo lub innych algorytmów w analizie niezawodności kratownic, dla których funkcja stanu granicznego nie musi być a priori zdefiniowana, aby porównać ją z obliczeniami systemowymi. Takie podejście wymagałoby prawdopodobnie wykorzystania zaawansowanych narzędzi obliczeniowych. Czy jednak w przypadku kratownic wielokrotnie statycznie niewyznaczalnych, dla których rozpatrzenie wszystkich możliwych scenariuszy zniszczenia jest trudne lub wręcz niemożliwe, takie podejście nie byłoby w rezultacie mniej pracochłonne? W pracy brakuje komentarza na ten temat. Wynika to m.in. z przyjętych założeń mocno ograniczających zakres obliczeń. Należy jednak podkreślić, że przyjęte założenia z uwagi na wykonaną w pracy analizę kratownic, a nie np. ram są uzasadnione.

5. Uwagi szczegółowe.

1. W przeglądzie literatury (Rozdział 1.2) dokonano selektywnego wyboru prac o tematyce pożarowej i probabilistycznej. Brakuje bardziej szczegółowego omówienia niektórych znanych rozwiązań, np. specyficznych algorytmów obliczeniowych zespołu prof. Kamińskiego (Politechnika Łódzka), którego prace są m.in. poświęcone przestrzennym wieżom kratowym w warunkach pożarowych (np. Kamiński i Strąkowski, Archives of Civil and Mechanical Engineering 2013). Jednak wybór zaprezentowanych prac należy ocenić jako właściwy, reprezentatywny i wystarczający.
2. Wiele informacji w Rozdziale 2 (Analiza pożarowa konstrukcji stalowych) przedstawiono w zbyt obszerny sposób. Część z nich w dalszej części pracy nie zostało wykorzystanych.
Wzory i wykresy dotyczące np. zmiany ciepła właściwego wraz ze wzrostem temperatury (Rys. 2.1) czy zmiany współczynnika rozszerzalności termicznej (Rys. 2.5) w pewnych zakresach znacznie się różnią. Autorka nie podjęła próby interpretacji powodów tak dużych różnic, a ma to fundamentalny wpływ na wyniki obliczeń.
W Rozdziale 2.4.2.1 (Nominalne krzywe temperatura-czas) wymieniono różne krzywe w tym standardową i węglowodorową ale nie opisano w jakich warunkach są one wykorzystywane. Zrobiono to w dalszej części pracy (str. 92, 93, a także 135).
Ponadto w Rozdziale 4 Autorka zaproponowała autorską wykładniczą krzywą pożarową, jednak brakuje opisu w jakim celu i na jakiej podstawie została wprowadzona, obok tych już wcześniej wymienionych.
3. Rozdział 2.2.4 (Zmodyfikowany algorytm MES w analizie pożarowej) ma zupełnie inny charakter i powinien być umieszczony w innym miejscu pracy, gdyż trudno go uznać za integralną część rozdziału 2.2 (Właściwości stali w podwyższonych temperaturach). O ile wcześniejsze i późniejsze podrozdziały rozdziału 2 zawierają jedynie informacje zaczerpnięte z literatury to rozdział 2.2.4 omawia interesujący, autorski algorytm przeprowadzonych obliczeń. Z tego powodu opis ten wydaje się także być zbyt lakoniczny.
4. W Rozdziale 2.5 wyznaczono wskaźnik niezawodności dla warunków pożarowych $\beta = 1,34$. Nie wszystkie parametry potrzebne do jego oszacowania są oczywiste, np. przyjęcie pola pomieszczenia $A = 40 \text{ m}^2$ wymaga jakiegoś uzasadnienia, gdyż później parametr β jest wykorzystywany w obliczeniach kratownic o określonej rozpiętości.
5. Przedstawiony w Rozdziale 3 opis metod probabilistycznych ma w większej części standardowy, podręcznikowy charakter. Elementem wyróżniającym jest omówienie analizy systemowej. Wiąże się to ze zdefiniowaną wcześniej „strukturą

niezawodnościową”, na której podstawie szacowane jest „bezpieczeństwo, a w konsekwencji niezawodność” konstrukcji. Tego typu podejście należy uznać za oryginalne.

6. Wydaje się, że metody FORM, SORM, Losowanie z funkcją ważności oraz Monte Carlo zostały w Rozdziale 3 opisane w zbyt teoretyczny i ogólnikowy sposób. Nie ma żadnych szczegółowych informacji o algorytmach obliczeniowych wykorzystanego programu.
7. W Rozdziale 3 Autorka wykazuje, że zastosowanie metody Monte Carlo w zagadnieniach inżynierskich praktycznie nie jest możliwe. Jednak prace cytowane w rozprawie, a także własne obliczenia Autorki wskazują, że takie obliczenia są możliwe i zazwyczaj są traktowane jako referencyjne.
Według Autorki także Losowanie z funkcją ważności (Importance sampling) „... znacznie zwiększa efektywność estymacji, przy czym wciąż konieczne jest przeprowadzenie kilku tysięcy symulacji.” Jednak w następnym fragmencie tekstu liczba potrzebnych realizacji szacowana jest na „od 20 do 100”. Można więc dostrzec niekonsekwencję w ocenie metod probabilistycznych.
8. Czy zawyżenie wskaźnika niezawodności z programu komputerowego Numpress Explore (str. 135) nie podważa wiarygodności tych obliczeń? W obliczeniach wprowadza się funkcję stanu granicznego (np. wzór 4.10), która dotyczy elementów kratownicy a nie jej całości (porównaj rys. 4.44). A więc obliczenia FORM, SORM dotyczą raczej elementów i stąd wynikają te różnice w wynikach w porównaniu z metodą systemową.
9. W kilku miejscach w pracy (np. w punkcie 4a w Posumowaniu i Wnioskach) wskazano, że połączenie programu MES3D (autorstwa W. Szańca) z Numpress Explore umożliwia przeprowadzenie analizy niezawodnościowej konstrukcji w przypadku, gdy funkcja stanu granicznego nie jest jawna. Jednak w pracy nie podano algorytmu takich obliczeń; byłby to ciekawy i oryginalny fragment pracy. Ponadto w żadnym z przykładów nie zaznaczono wyraźnie, że takie podejście zostało wykorzystane.
10. Analizując wyniki obliczeń (np. Tabela 4.24) można zauważyć, że metoda Monte Carlo od pewnego etapu trwania pożaru wymaga znacznie mniejszego czasu obliczeń. W pracy nie wyjaśniono w dostateczny sposób skąd ten gwałtowny spadek wynika. Ponadto nie jest podawana ani liczba próbek, ani kryteria, które zadecydowały o przerwaniu obliczeń metodą Monte Carlo.
Z kolei dla wyjściowej konstrukcji nieobciążonej temperaturą za pomocą metody Monte Carlo nie uzyskano żadnych wyników (str. 135). Czy zadecydował o tym dopuszczalny czas obliczeń, ograniczona liczba próbek czy inne przyczyny? Czy nie można było wykonać obliczeń własną wersją metody Monte Carlo, wykorzystując metody redukcyjne, np. próbkowanie warstwowe, sześcian łąciński lub inne?
11. W Tabeli 4.2 wyznaczono „błąd względny” pomiędzy wynikami uzyskanymi dla krzywej wykładniczej i standardowej. Czy te relacje należy określać jako błąd, czy są to jedynie różne odpowiedzi dla różnych scenariuszy pożarowych?
Dodatkowo w Tabeli 4.2 umieszczono wartości wskaźnika ekspozycji poszczególnych przekrojów, ponieważ wg Autorki „jest on ściśle związany z wartością otrzymywanego błędu” (str. 91). Nie wyjaśniono z czego te relacje wynikają.
12. Wydaje się, że niektóre z przyjętych zmiennych losowych powinny być skorelowane, o czym Autorka napisała omawiając kierunki dalszych badań (str. 199). Należy jednak zdawać sobie sprawę z trudności obliczeniowych pojawiających się przy takim założeniu.

13. Czy można było wykorzystać symetrię kratownic i ich obciążenia? Czy te rozwiązania powinny być symetryczne skoro z założenia obciążenia temperaturą są równomierne w przekroju i dla całej konstrukcji?
14. Dlaczego Autorka napisała, że „nie indukują się dodatkowe siły w przypadku kratownic statycznie niewyznaczalnych” (str. 116)? Może wynika to z faktu, że te kratownice są równomiernie ogrzewane?
15. Poszczególne mechanizmy zniszczenia kratownic określano poprzez analizę spektralną macierzy sztywności za pomocą modułu obliczeniowego przygotowanego w programie Mathematica przez P. Obarę (str. 157). Jednak we wprowadzeniu i zakończeniu wskazano ten program jako Autorski. Wymaga to wyjaśnienia, chociaż analiza spektralna nie wymaga żadnej zaawansowanej wiedzy, jeżeli korzysta się z gotowych programów komputerowych.

6. Inne uwagi.

1. W pracy nie umieszczono spisu rysunków i tablic oraz spisu ważniejszych symboli i oznaczeń, co utrudnia jej czytanie.
2. Niepotrzebnie umieszczono szczegółowe dane o wykorzystanym komputerze i czasach obliczeniowych. W rozwiązywaniu tego typu ilustracyjnych przykładów nie ma to większego znaczenia.
3. Współczynniki $\gamma_{M,0}$ i $\gamma_{M,fi}$ przyjmują wartość 1,0 (wzór 2.55 na str.60. Nie wyjaśniono dlaczego przyjęto taką wartość i jaka role to współczynniki spełniają.
4. Funkcję stany granicznego $N = E$ na rys. 3.6 narysowano błędnie, gdyż nawet na poglądowym szkicu nie powinna ona przecinać łącznej funkcji gęstości dzieląc ją w połowie.
5. Na str. 96 zdefiniowano „swobodnie podpartą kratownicę”. A czy może być inna? Istotne dla obliczeń jest określenie czy kratownica jest statecznie wyznaczalna.
6. Nie wyjaśniono parametru W we wzorze 3.29 na str. 77.

7. Uwagi językowe.

Pracy zawiera stosunkowo niewiele błędów językowych, niezręcznych sformułowań, usterek literowych, itp.. Do nielicznych niedociągnięć należy zaliczyć:

- pominięte litery, np. Radońsk zamiast Radońska w spisie literatury, poz. [37],
- małe zamiast dużych liter, np. w „Archives of civil engineering” w tym samym cytowaniu [37], a także „Fire safety journal” w [6],
- w opisie wzór 2.48 na str. 58 zamiast $q_{i,d}$ powinno być $q_{f,d}$,
- zamiast „... do czołowych naukowców należy zaliczyć Maślaka, ...”, chyba lepiej byłoby napisać prof. Maślaka,
- wątpliwości budzi sformułowanie o „rozpisaniu struktury niezawodnościowej” (str. 43),
- czy można napisać, że „Metoda Monte Carlo posiada kilka odmian, ...” (str. 76),
- a także „... duża ilość publikacji ...” zamiast „liczby” (str. 24),
- chociaż wg nowego słownika poprawnej polszczyzny PWN pod red. A. Markowskiego sformułowanie „w oparciu” nie należy ganić w każdym kontekście to jednak w pracy jest chyba nadużywane: „... wykorzystanie metody opartej na właściwościach ...” (str. 24), „opartego o częściowe współczynniki bezpieczeństwa ...”, (teza ze str. 25), normowe podejście oparte na stosowaniu” (str.27), „Projektowanie konstrukcji... jest oparte na

analizie oddziaływań termicznych” (str. 52), „posunięcie opiera się na ...” (str. 77), „opartej na stosowaniu krzywych pożarowych” (str. 87).

W wielu miejscach obok polskiego nazewnictwa przywołano także odpowiedniki angielskie. To ułatwia czytanie, gdyż często w nazewnictwie polskim nie ma powszechnie stosowanych właściwych odpowiedników terminologii angielskiej.

W pracy konsekwentnie stosowana jest nazwa w języku angielskim metody „Importance sampling”, podczas gdy w języku polskim powinno się przyjąć np. „Losowanie z funkcją ważności”.

8. Ocena rozprawy.

Praca omawia ważny temat ochrony pożarowej konstrukcji inżynierskich. Celem pracy jest nie tylko rozwijanie metod obliczeniowych dotyczących wpływu pożaru na konstrukcję, ale także próba odpowiedzi na pytanie jaka niepewność towarzyszy standardowym obliczeniom wykonanym na podstawie danych normowych. Uwagi krytyczne nie podważają wagi pracy i uzyskanych przez Autorkę wyników.

Autorka wykazała ogromną wszechstronność zainteresowań zagadnieniami pożarowymi łącząc wiedzę na temat ochrony pożarowej konstrukcji z zaawansowanymi metodami obliczeniowymi. Dobra znajomość literatury przedmiotu pozwoliła Autorce na swobodne wykorzystanie najlepszych, a przede wszystkim skutecznych rozwiązań. Kreatywnie zastosowała programy komputerowe Numress Explore, MES3D, Mathematica i Excel oraz zbudowała własne algorytmy umożliwiające zaawansowaną analizę konstrukcji obciążonych temperaturą. Na wyróżnienie zasługuje autorska analiza systemowa, która w połączeniu z modułem przygotowanym w środowisku Excel pozwala na oszacowania współczynnika niezawodności Hasofera-Linda na każdym etapie trwania pożaru.

Wyniki pracy wnoszą wiele ciekawych elementów poznawczych. Uzyskano konkretne liczbowe relacje dotyczące wpływu pożaru na konstrukcje kratowe. Zebrane wyniki pozwalają na dalszą kontynuację podjętych tematów.

Pracę cechuje logiczny układ rozdziałów, sformułowanie wartościowych wniosków o charakterze ogólnym, odpowiedni język i właściwie dobrana obszerna literatura.

Wszechstronne zaawansowane analizy niezawodnościowe w niedalekiej przyszłości staną się standardowymi obliczeniami inżynierskimi, przede wszystkim z uwagi na gwałtowny wzrost możliwości współczesnych komputerów i dostępności zaawansowanego oprogramowania. Recenzowana praca wpisuje się więc w ważny nurt badawczy.

9. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 r. oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. Dz. U. Nr 204 poz. 1200) i stawiam wniosek o dopuszczenie Pani mgr. inż. Katarzyny Kubickiej do jej publicznej obrony.

Dawid G. S.