

Prof. dr hab. inż. Jarosław Górski
Katedra Mechaniki Budowli
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
tel. 606 313 907
e-mail: jgorski@pg.edu.pl

Gdańsk, 03.08.2023

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr. inż. **Justyny Tomasik**

Analiza parametryczna dwuwarstwowych kratownic typu tensegrity – model dyskretny i kontynualny

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest pismo Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej prof. dr. hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka, z dnia 10.05.2023 i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Justyny Tomasik pt. „Analiza parametryczna dwuwarstwowych kratownic typu tensegrity – model dyskretny i kontynualny”, wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Pauliny Obar, prof. PŚk.

2. Podstawowe dane o pracy

Praca składa się z ośmiu rozdziałów zakończonych bibliografią oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim. Materiał przedstawiono na 288 stronach formatu A4. Praca zawiera 150 wzorów, 171 rysunków, 77 tabel oraz przytacza 281 pozycji literatury. Rozprawa jest napisana czcionką 12 punktową w odstępie 1,5 linii.

3. Omówienie struktury pracy

Otwierający pracę **Wstęp** (3 strony) podzielono na trzy podrozdziały. W Rozdziale 1.1 (*Przedmiot rozważań*) zdefiniowano pojęcie struktur typu tensegrity, ich specyficzną rolę w tworzeniu i postrzeganiu otoczenia oraz uzasadniono podjęcie tematu pracy. W Rozdziale 1.2 zgodnie z tytułem przedstawiono w punktach: *cel, zakres i założenia pracy*. W Rozdziale 1.3 (*Układ pracy*) szczegółowo omówiono strukturę pracy z podziałem na rozdziały.

W **Rozdziale 2** (23 strony, 27 rysunków), zatytułowanym *Dwuwarstwowe kratownice typu tensegrity* w czterech podrozdziałach przedstawiono zarys historii rozwoju tego typu elementów zarówno w sztuce jak i budownictwie (2.2. *Zarys historyczny*), zilustrowano stosowane schematy i moduły tensegrity (2.3. *Wzory strukturalne i podstawowe moduły tensegrity*) oraz przedstawiono przykłady wykorzystania płyt zbudowanych z modułów tensegrity (2.4. *Przykłady płyt tensegrity w budownictwie*). Rozdział zawiera obszerny przegląd literatury przedmiotu badań.

Rozdziale 3 (22 strony, 9 rysunków, 2 tabele, 55 wzorów) zatytułowano *Charakterystyczne cechy struktur tensegrity*. We *Wprowadzeniu* (Rozdz. 3.1) uzupełniono informacje o historii rozwoju tensegrity. Ponadto po krótkim wprowadzeniu formalnym (Rozdz. 3.2. *Opis matematyczny* i 3.3. *Identyfikacja cech charakterystycznych*) przedstawiono własną oryginalną klasyfikację struktur tensegrity. W Rozdział 3.4 (*Przykłady zachowania się płaskich struktur*) przedstawiono pięć podstawowych schematów ilustrujących zastosowanie wprowadzonej klasyfikacji.

Rozdział 4 (28 stron, 6 rysunków, 6 tabel, 94 wzory) otwiera wprowadzenie dotyczące specyfiki opisu struktur tensegrity w ujęciu dyskretnym i kontynualnym (4.1 *Wprowadzenie*). W Rozdz. 4.2 przedstawiono geometrycznie nieliniowy model dyskretny w ujęciu metody elementów skończonych. Następnie przedstawiono opis sześcioparametrowej teorii powłok (Rozdz. 4.3) zastosowanej do analizy ortotropowych płyt i pasm płytowych. Rozdział 4.4 opisuje model kontynualny. Przedstawiono procedurę wyprowadzenia zastępczych charakterystyk materiałowych, wykorzystujących cztery różne transformacje macierzowe. Rozdział 4. zawiera obszerny zestaw wzorów wykorzystanych w obliczeniach.

Rozdział 5 (66 stron, 61 rysunków, 32 tabele) zawiera analizę jakościową schematów tensegrity przy zastosowaniu modelu dyskretnego (Rozdz. 5.1). Rozpatrzono mechaniczne zachowanie pięciu klasycznych modułów trójwymiarowych (Rozdz. 5.2) i płyt tensegrity zbudowanych z tych modułów (Rozdz. 5.3-5.7). W każdym przypadku przeprowadzono kwalifikację konstrukcji zgodnie z wcześniejszymi propozycjami.

Rozdział 6 (94 strony, 61 rysunków, 32 tabele) zawiera analizę ilościową struktur tensegrity. Zbadano wpływ poziomu stanu samonapężenia na przemieszczenia oraz sztywność i nośność konstrukcji. Ocenę ilościową, obejmującą obliczenia odpowiedzi konstrukcji na działanie obciążeń statycznych, wykonano stosując obliczenia quasi-liniowe (teoria II rzędu) i nieliniowe (teoria III rzędu). Wykonano analizę schematów omówionych w Rozdz. 5.

Rozdział 7 (9 stron, 7 rysunków 1 wzór, 5 tabel) obejmuje analizę ilościową schematów tensegrity przy zastosowaniu podejścia kontynualnego. W celu walidacji zaproponowanego rozwiązania, rozpatrzono najpierw konstrukcję geometrycznie niezmienną, którą nie można zakwalifikować do grupy tensegrity (Rozdz. 7.2 *Model „nie” tensegrity*), a następnie rozważono płytę i pasmo płytowe (Rozdz. 7.2 *Struktury tensegrity*) zbudowane z modułu *modified Quartex*.

W **Rozdziale 8** *Podsumowanie* (4 strony) przedstawiono wnioski sformułowane na podstawie przeprowadzonych badań.

Bibliografia zawiera 281 pozycje.

Pracę kończą **streszczenia** w języku polskim i angielskim.

4. Ocena doboru tematu.

W pracy wykonano wszechstronną analizę schematów typu tensegrity. Z uwagi na złożoność tego tematu, niestandardowe metody analizy, a także brak dostępnych ujednoczonych algorytmów obliczeniowych, praca jest istotnym intelektualnym wyzwaniem dla osób zajmujących się tą tematyką. Wyjściowym elementem analizy jest zdefiniowanie jakie cechy wyróżniają konstrukcje tensegrity i jak je odróżnić np. od niestandardowych kratownic, które często określane są błędnie jako tego typu schematy. Tensegrity nie są powszechnie wykorzystywane jako użytkowe konstrukcje inżynierskie, a raczej jako spektakularne twory, na pograniczu inżynierii i sztuki, mające wywołać pozytywne, nieszablonowe wrażenia estetyczne. Znajdują też zastosowanie użytkowe np. jako atrakcyjne wizualnie namioty imprezowe czy wystawiennicze, zadaszenia itp. Jednak nawet takie zastosowania wymagają przeprowadzenia procesu projektowania, a więc algorytmów obliczeniowych. Zrozumienie mechanicznej pracy tego typu konstrukcji pozwoli na ich szersze wykorzystanie w praktyce inżynierskiej. Praca wnosi więc znaczący wkład w rozwój zaawansowanych technik obliczeniowych.

5. Uwagi szczegółowe.

1. Nie sformułowano tezy pracy a jedynie jej cel „statyczna analiza parametryczna dwuwarstwowych kratownic typu tensegrity z wykorzystaniem podejścia dyskretnego i kontynualnego” (Rozdz. 1.2). Wyniki obliczeń powinny mieć jednak wyraźnie

sformułowane przeznaczenie. A więc brak tezy lub szczegółowego opisu celu pracy utrudnia jej merytoryczną ocenę.

2. We wstępie (Rozdz. 1.1) Autorka opisuje schematy tensegrity jako „uniwersalną zasadę rządzącą wszechświatem” i dodaje, że „koncepcję stabilności i równowagi pomiędzy ściskaniem i rozciąganiem tłumaczy zachowanie rzeczy błahych, i tych bardziej skomplikowanych”. Ponadto w rozdz. 2.1 Autorka zwraca uwagę, że „zagadnienia powiązane z analizą zachowania się ustrojów tensegrity są bardziej skomplikowane niż w przypadku tradycyjnych systemów konstrukcyjnych”. Być może właśnie to są powody inspiracji lub wręcz intelektualnego wyzwania dla naukowców usiłujących rozwikłać te obliczeniowe problemy.
3. Praca dotyczy obliczeń dyskretnych i kontynualnych. Jednak pomiędzy opisem obu metod istnieją duże dysproporcje. Metoda kontynualna nie została w pracy należycie przedstawiona. W rozdz. 1.1 stwierdzono, że „Niniejsza praca ... sprawdza celowość stosowania podejścia kontynualnego” Wydaje się, że ten cel nie został doprowadzony do końca, o czym Autorka wspomina w Rozdz. 7. Pomimo to Rozdz. 7 *Weryfikacja modelu kontynualnego*, poprzedzona przedstawieniem odpowiednich podstaw teoretycznych i wzorów w Rozdz. 4, są najważniejszymi i najwartościowszymi fragmentami pracy. Zweryfikowano m.in., czy przekrycie płytowe typu tensegrity ma taki sam sens jak zastępcze przekrycie powłokowe, a jeśli nie, to dlaczego i w jakim zakresie. Szkoda, że te elementy nie zostały należycie rozwinięte. Ponadto, istotnym elementem obliczeń ukierunkowanych na projektowanie konstrukcji są naprężenia. Model kontynualny chyba nie pozwala na taką podstawową analizę inżynierską.
4. W pracy przedstawiono ogromną liczbę szczegółowo zapisanych wzorów bez wyjaśnienia jak wykorzystano je w obliczeniach, np. wprowadzając ilustrujące schematy blokowe. Jedyne ograniczone informacje na ten temat (około pół strony) znajdują się dopiero w *Podsumowaniu* (Rozdz. 8). Tam też umieszczono informacje o zastosowaniu programu Mathematica oraz utworzeniu dodatkowego makro wspomagającym opracowanie wyników napisanego w Excelu. Skoro praca ukierunkowana jest praktycznie wyłącznie na metody obliczeniowe, to taki układ oraz minimalne informacje o własnym oprogramowaniu są wyraźnym niedociągnięciem. Zaawansowane i niestandardowe kody obliczeniowe są znaczącym wyróżnikiem tej pracy.
5. W pracy nie wszędzie wskazano, które z przedstawianych równań są zaczerpnięte z dostępnych źródeł, a które rozwiązania są autorskie. Część wyprowadzeń wykonanych w środowisku Mathematica została jednak udokumentowana, np. Rys. 4.5.
6. Układ pracy nie ułatwia jej czytania. Wiele obliczeń się powtarza. Na przykład, w Rozdz. 5 wykonano praktycznie te same analizy dla kilku klasycznych schematów tensegrity. Podobna sytuacja występuje w kolejnych rozdziałach. Taki układ jest nurzący dla czytelnika. Wydaje się że właściwe byłoby umieszczenie powtarzających się fragmentów w Dodatkach na końcu pracy, a w części głównej jedynie ich podsumowania.
7. Pomimo, że praca ma charakter czysto teoretyczny Autorka próbuje także przedstawić tensegrity jako konstrukcje budowlane. Jednak pomimo ogromnej liczby umieszczonych rysunków i zdjęć trudno znaleźć uzasadnienie tego typu klasyfikacji. Rysunek 2.6c raczej nie przedstawia przykładów zastosowań inżynierskich. W Rozdz. 2.4. (*Przykłady płyt tensegrity w budownictwie*) przedstawiono literaturę dotyczącą zastosowań konstrukcji płytowych. Niektóre z tych schematów zostały także zbadane doświadczalnie. Jednak większość konstrukcji pozostaje w sferze propozycji, a przedstawione na Rys. 2.26 rzeczywiste przykłady (Bank Annex w Atenach, Grecja, czy pawilon wystawowy w Patras,

Grecja) trudno nazwać konstrukcjami użytkowymi. Są to raczej spektakularne wizualnie schematy czy konstrukcje.

8. Autorka stwierdza, że „Skomplikowana geometria oraz występowanie stanu samonapężenia i mechanizmów, uniemożliwiających zastosowanie komercyjnych programów komputerowych, skutecznie utrudnia stosowanie struktur tensegrity w konstrukcjach inżynierskich.” (Rozdz. 4.3). Czy jest to jedyna przyczyna ograniczonej liczby implementacji inżynierskich? Czy wprowadzenie metody kontynualnej na pewno rozwiąże te problemy?
9. W pracy przedstawiono ogromną liczbę różnych wariantów modułów stanowiących bazę większych konstrukcji. Czy można wprowadzić dodatkową klasyfikację z uwagi na realną możliwość wykorzystania schematów tensegrity w budownictwie? W tym celu można byłoby stworzyć dodatkowe kryteria oceny schematów, np. podatność, stateczność, zdolność do przenoszenia dużych obciążeń, także dynamicznych, itp.
10. W pracy można znaleźć ważne wnioski z punktu widzenia zastosowania konstrukcji tensegrity. Na przykład w Rozdz. 4.1 Autorka zwraca uwagę, że „Druga istotna cecha tych systemów dotyczy wielkości przemieszczeń, które mogą być duże, nawet jeśli odkształcenia są małe.” Czy ten wniosek nie dyskredytuje schematów typu tensegrity jako konstrukcji użytkowych? Może jednak niektóre schematy określane jako *konstrukcja o cechach tensegrity klasy 1* lub nawet *klasy 2* można zastosować w standardowych konstrukcjach budowlanych? Oczywiście przy wykorzystaniu takich schematów traci się podstawową cechę *idealnych tensegrity* umożliwiających aktywne sterowanie poziomem stanu samonapężenia. Szkoda, że w pracy nie ma próby rozwinięcia tego tematu.
11. Obciążenia przyjęte w obliczeniach można określić jako ilustrujące przykłady. Brakuje jakichkolwiek uwag na temat możliwych obciążeń, a także sposobu ich przykładania do konstrukcji. Można sformułować np. następujące pytanie: czy z uwagi na charakter tych struktur możliwe jest przyjęcie obciążenia dynamicznego (wiatr) lub sejsmicznego? O rozszerzeniu analizy o zagadnienia dynamiczne Autorka wspomina w *Podsumowaniu* (rozdz. 8).
12. Przegląd literatury jest starannie wykonany, choć w dużej mierze czerpie z kilku fundamentalnych prac (prace prof. Gilewskiego przywoływane są w tekście około 60 razy, prof. Al Sabouni-Zawadzkiej około 50 razy, a prof. Obary ponad 30 razy). Jednak praktycznie żadna z pozycji umieszczona w bibliografii nie została omówiona szczegółowo a jedynie przywołana. Szczególnym przykładem takiego podejścia jest spis autorów wymienionych na stronie 26 bez jakichkolwiek cytowania. Nie ma też dogłębnych porównań z literaturą dotyczącą obliczeń przedstawionych w pracy. Ponieważ praca skupia się przede wszystkim na algorytmach obliczeniowych warto byłoby szczegółowo opisać co inni zaproponowali w tym zakresie.
13. Rozdział 3 jest ciekawą propozycją klasyfikacji schematów typu tensegrity. Wprowadzone pojęcia i metody klasyfikacji zostały przedstawione w kilku przykładach. Jednak dobór przykładów budzi wątpliwości (tablica 3.2). Czy przykład jednego pręta a nawet dwóch prętów połączonych przegubem nie są zbyt trywialne nawet jeżeli takie układy pozwalają na łatwą ilustrację formalnych zapisów?
14. W pracy przedstawiono analizę struktury zbudowanych z elementów podstawowych. Dlaczego wybrano właśnie te i dlaczego zaprezentowano ich tak dużo? Brakuje rzeczowego uzasadnienia. Czy w pracy nie powinny być przedstawione jedynie wybrane konstrukcje reprezentatywne? Po przeprowadzeniu wszystkich analiz brakuje podsumowujących wniosków.

15. Przedstawione wnioski (Rozdz. 8) są raczej streszczeniem pracy. Nie zawierają praktycznie uogólnień czy podsumowań. Nie mają niestety znaczenia inżynierskiego. Nie kończą się np. wskazaniem wariantów modeli, które można stosować, a które odrzucić. Wnioski powinny być lepiej opracowane, gdyż w poszczególnych rozdziałach, przede wszystkim w Rozdz. 6 wiele wyników stanowi podstawę do rzeczowych, konkretnych opinii. Jednak właśnie w Rozdz. 8 znalazł się ważny opis oprogramowania stosowanego przez Autorkę. Ten fragment powinien pojawić się w innym miejscu pracy.
16. W pracy nie ma żadnego porównania jak tego typu obliczenia mogłyby przebiegać przy zastosowaniu komercyjnego programu MES. Nie jest to konieczne ale wyjaśniłoby dlaczego w analizach schematów tensegrity powinno się stosować alternatywne rozwiązania. Warto jednak zwrócić uwagę, że gdyby projektant miał do wykonania tego typu obliczenia prawdopodobnie musiałby zastosować komercyjny program MES.

6. Inne uwagi o pracy

1. W pracy nie umieszczono spisu rysunków i tablic oraz spisu ważniejszych symboli i oznaczeń, co utrudnia jej czytanie.
2. Pracy jest starannie napisana i praktycznie nie zawiera błędów językowe czy niezręcznych sformułowań. Błędy edytorskie typu „... pyty ortotropowej ...” (str. 261), czy „... wyniki należy porównać z rezultaty należy porównywać z tymi otrzymanymi poprzez model dyskretny ...” (str. 254) należą do rzadkości.
3. W pracy pojawiły się też zaskakujące opisy, np. błędy w rozwiązaniach przedstawionych na rys. 6.1 opisano jako $2,6 \cdot 10^5$. Czy tak duże różnice (rzędu 10^5) można nazwać jeszcze błędami?

7. Oryginalne elementy pracy.

Autorka nie wskazała elementów oryginalnych swojej pracy. Elementami oryginalnymi lub wyróżniającymi pracę są:

1. Zaproponowano unikatową klasyfikację struktur tensegrity na podstawie sześciu charakterystycznych cech.
2. Zastosowano analizę spektralną macierzy, nowatorską w porównaniu z innymi metodami typu *form-finding*. Wskazano także jak należy ją zastosować w identyfikacji stanów samonapężenia i mechanizmów schematów tensegrity.
3. Przedstawiono procedurę tworzenia zastępczych charakterystyk materiałowych, wykorzystujących cztery różne ale uzupełniające się transformacje macierzowe.
4. Przedstawiono szczegółowe kompleksowe algorytmy obliczeniowe, gotowe do zastosowania w programach komputerowych.
5. Historia rozwoju konstrukcji tensegrity została przedstawiona w formie ciekawego eseju, mogącego wzbudzić zainteresowanie nawet postronnego czytelnika. Taki erudycyjny wstęp można uznać za zbędny w pracy naukowej, ale jest to dobre wprowadzenie do zrozumienia koncepcji układów tensegrity.

8. Ocena rozprawy.

W pracy sformułowano algorytmy obliczeniowe konstrukcji tensegrity. Wprowadzono unikatową klasyfikację tych schematów. Zastosowanie metod kontynualnych należy uznać za oryginalny wkład Autorki w metody obliczeniowe tego typu konstrukcji. Z uwagi na coraz większe zainteresowanie systemami tensegrity praca wpisuje się w aktualny nurt badawczy.

Autorka włożyła ogromną pracę w rozpoznanie i uporządkowanie teorii dotyczących schematów tensegrity. Wykazała wszechstronność zainteresowań zaawansowanymi metodami obliczeniowymi. Stworzyła własne oprogramowanie umożliwiające kompleksową analizę modułów i konstrukcji tensegrity. Wyniki pracy wnoszą wiele ciekawych elementów poznawczych. Przedstawione analizy pozwalają na dalszą kontynuację podjętych tematów.

Uwagi krytyczne nie podważają znaczenia pracy i uzyskanych przez Autorkę wyników. W większości dotyczą jedynie koncepcji struktury pracy i jej układu.

9. Wniosek końcowy.

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Autorki, a także Jej umiejętności w samodzielnym prowadzeniu pracy naukowej. Stwierdzam więc, że rozprawa spełnia warunki stawiane pracom doktorskim (Ustawa „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 roku z późniejszymi zmianami, określonymi w art. 187 Ustawy Dz.U.2018, poz. 1668) i stawiam wniosek o dopuszczenie Pani mgr. inż. Justyny Tomasik do jej publicznej obrony.

Dodatkowo, stawiam **wniosek o wyróżnienie pracy doktorskiej Pani mgr Justyny Tomasik**. Uzasadnienie wniosku stanowi punkt 7 niniejszej recenzji (Oryginalne elementy pracy).

Justyna Golec

Recenzji zgodne z wymogami formalnymi

DYREKTOR NAUKOWY DISCYPLINY
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

Wawrz
prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk