

Olsztyn, 31 sierpnia 2023 r.

Prof. dr hab. inż. Leszek Małyszko

Katedra Mechaniki i Konstrukcji Budowlanych
Instytut Geodezji i Budownictwa Wydziału Geoinżynierii
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie

Przejęte 05/08/2023

WPLYNEŁO

05.08.2023

469 / 2023

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ

prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Piotrowskiego

*Weryfikacja modeli konstytutywnych sprężysto-plastyczności
przy zastosowaniu MES i optycznej korelacji obrazu*

Promotor: prof. dr hab. inż. Stanisław Jemioło

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Marcin Gajewski, prof. uczelni

1. Uwagi ogólne

Rada Naukowa Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej powołała mnie na recenzenta uchwałą nr 711/2023 r. w dniu 6 czerwca 2023 r. Stosowne dokumenty, w tym umowę na recenzję z Wydziałem Inżynierii Lądowej, reprezentowanym przez dziekana prof. dr hab. inż. Andrzeja Garbacza oraz egzemplarz rozprawy i kopie uchwały otrzymałem na początku lipca.

2. Charakterystyka i informacja o rozprawie

Rozprawa liczy 404 strony i składa się sześciu rozdziałów (233 strony), trzech załączników (150 stron) i bibliografii (10 stron) oraz polskiego i angielskiego streszczenia. Bibliografia zawiera 120 publikacji, na które Doktorant powołuje się w rozprawie. Są tam zarówno normy z zakresu konstrukcji stalowych, podręczniki i artykuły dla użytkownika systemu optycznej korelacji obrazu i metody elementów skończonych, jak i instrukcje obsługi maszyny wytrzymałościowej. Poza podstawowymi podręcznikami na temat teorii plastyczności, metody elementów skończonych oraz mechaniki prętów cienkościennych, Doktorant powołuje się na artykuły z najnowszą wiedzą w zakresie rozprawy oraz w dziesięciu publikacjach jest jednym ze współautorów, w tym siedmiokrotnie jako pierwszy autor.

W **rozdziale 1** *Cel i zakres pracy* (4 strony), Doktorant podał zakres pracy oraz określił środowisko badawcze, które wybrał do realizacji celu określonego tytułem rozprawy. Weryfikację modeli konstytutywnych prowadził na podstawie symulacji laboratoryjnych testów jednoosiowego rozciągania oraz ściskania perforowanych profili cienkościennych za pomocą systemu metody elementów skończonych *Abaqus/Standard*. Laboratoryjne testy pod monotonicznym obciążeniem statycznym Doktorant zapisywał za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu *Aramis*.

Rozdział 2 *Podstawowe pojęcia i równania teorii sprężysto-plastyczności metali* (16 stron) ma charakter ściśle teoretyczny. W sposób bardzo zwięzły Doktorant omawia związki konstytutywne stosowane w pracy na tle przeglądu podstawowej literatury zarówno krajowej, jak i światowej, odwołując się do bibliografii (do ponad 60 pozycji). Pojęcia zostały podane ściśle, co było możliwe przez stosowanie notacji tensorowej prawie we wszystkich wzorach rozdziału. Podstawowy model przyjęty do weryfikacji bazuje na izotropowym sprężysto-plastycznym materiale ze stowarzyszonym prawem płynięcia. Sprężystość jest tensorowo liniowa, a w zakresie poza sprężystym warunków plastyczności Hubera-Misesa jest ze wzmocnieniem izotropowym albo kinematycznym, przy czym stosowana jest zarówno teoria małych, jak i dużych deformacji.

Rozdział 3 *Badania materiałowe* (68 stron) zawiera wyniki testów laboratoryjnych, których celem było zbadanie właściwości mechanicznych stali użytej w podstawowych elementach próbnych, m.in. modułu Younga, granic plastyczności i proporcjonalności, wytrzymałości na rozciąganie. Na podstawie własnych algorytmów Doktorant opracował statystycznie obszerne wyniki statycznych testów rozciągania z odciążeniem, rejestrowanych za pomocą tensometru elektrooporowego i systemu cyfrowej korelacji obrazu. Przeprowadził także analizę rozwoju odkształceń i stref plastycznych. Otrzymana znaczna zmienność parametrów mechanicznych wskazała na niejednorodność stali i zależność od rodzaju kształtowników.

Rozdział 4 *Rozciąganie płaskownika z otworami* (18 stron) to symulacje w płaskim stanie naprężenia testu rozciągania niesymetrycznego, perforowanego płaskownika za pomocą elementów skończonych. Przebieg testu Doktorant wcześniej zarejestrował w systemie cyfrowej korelacji obrazu. W symulacjach stosował pięć różnych siatek, różniących się rozmiarami elementów oraz teorię małych i dużych odkształceń.

Rozdział 5 *Ściskanie perforowanych prętów cienkościennych o bardzo małej smukłości* (115 stron) jest podzielony na 3 podrozdziały, z których pierwszy zawiera wyniki testów laboratoryjnych (64 str.), drugi obliczenia analityczne według teorii prętów cienkościennych (11 str.), a trzeci symulacje testów metodą elementów skończonych, głównie według teorii dużych odkształceń i w obecności imperfekcji albo ich braku przy pełnym lub przegubowym zamocowaniu elementów badawczych (40 str.).

Laboratoryjne testy ściskania Doktorant przeprowadził na ponad stu elementach badawczych o ośmiu różnych wysokościach od 5 do 50 [cm], składających się perforowanych prętów cienkościennych o przekroju otwartym Ω , wpisanych w prostokąt 12x8 [cm]. W płytach dociskowych maszyny wytrzymałościowej ponad 60 prętów było zamocowane na sztywno, a pozostałe przegubowo. Większość testów dla każdej z wysokości była rejestrowana w systemie optycznej korelacji obrazu przy obu wariantach zamocowania. Wymiary i deformacje każdego elementu badawczego były mierzone zarówno przed, jak i po teście. Doktorant zaobserwował dwie główne postacie wyboczenia: lokalnie do środka dla próbek do [15 cm] oraz na zewnątrz dla wyższych. Sposób zamocowania płyt do maszyny oraz prętów do płyt nie wpływał na nośność, choć wpływał na postać deformacji. Na nośność decydujący wpływ miał kształtownik, z którego pobrano element badawczy. Rozwój pola odkształceń zarejestrowany za pomocą systemu optycznej korelacji obrazu jest podobny we wszystkich elementach badawczych poza tymi najkrótszymi. Pola największych odkształceń pojawiają się na środku

w narożach sąsiednich otworów trapezowych, łącząc się ze sobą. Największa wartość odkształcenia wskazuje na miejsca wygięcia pręta. W najkrótszych elementach badawczych, gdzie są pary otworów okrągłych i trapezowych, pola największych odkształceń zaczynają się przy otworach okrągłych, a następnie łączą się z polami przy otworach trapezowych.

Obliczenia analityczne według teorii prętów cienkościennych w podrozdziale drugim posłużyły do sporządzenia wykresów zależności siły krytycznej od długości prętów na tle wytycznych normowych przy różnych warunkach brzegowych i z uwzględnieniem wybożenia niesprężystego. Podrozdział ma charakter ilustracyjny.

Symulacje numeryczne testów doświadczalnych opisane w podrozdziale trzecim Doktorant przeprowadzał według teorii powłok, przyjmując sprężysto-plastyczne modele materiałów oraz różne warunki na końcach elementów badawczych w postaci zamocowania sztywnego lub obrotowego. Zamocowanie obrotowe znacznie obniża nośność i zwiększa gwałtowność wybożenia, chociaż symulacje różnią się od tych z zamocowaniem sztywnym jedynie postacią deformacji i wykresem siła - przemieszczenie w fazie postkrytycznej. Uzyskane postacie deformacji dla każdego rodzaju zamocowania wykazują duże podobieństwo do doświadczeń. Odkształcenia na środku są również bardzo podobne do otrzymanych w doświadczeniach, chociaż obraz odkształceń na powierzchni półki jest bardziej złożony. Doktorant uwzględnił przechyłowe lub łukowe imperfekcje albo je pomijał. Ich obecność poprawia zgodność otrzymanych ścieżek równowagi z doświadczeniami, chociaż symulacje według teorii małych odkształceń nie opisywały prawidłowo przebiegu doświadczeń, niezależnie od obecności imperfekcji. Różnicował też parametry plastyczne materiału, za pomocą odmiennych, jednowymiarowych zależności naprężenie – odkształcenie plastyczne oraz przyjmując wzmocnienie izotropowe albo kinematyczne. Rodzaj wzmocnienia nie miał jednak istotnego wpływu na wynik symulacji, choć być może lokalne odciążeniach były obecne. Uwzględnienie teorii dużych odkształceń w symulacjach pozwoliło na uzyskanie jakościowo dobrej ich zgodności z wynikami doświadczeń, nieco gorszej ilościowo, co zapewne wynika z dość dużej zmienności właściwości mechanicznych stali, głównie wartości modułu Younga i granicy plastyczności. Te parametry wpływają na postać wykresów zależności siły krytycznej od długości elementu badawczego, jak również jej zależności od przemieszczenia dla każdej długości.

Warto zauważyć, że ściskane perforowane elementy cienkościenne mają stosunkowo niewielką smukłość, co prawdopodobnie wynika z ograniczeń sprzętowych i braku możliwości badania elementów dłuższych. Pozwala to jednak zwrócić szczególną uwagę na lokalną utratę stateczności ścianek, która wpływa na globalną utratę stateczności. Jednak w modelowaniu numerycznym i analizie sformułowania prętowe mają tylko charakter pomocniczy.

W **rozdziale 6 Podsumowanie i wnioski** (8 stron) Doktorant w ramach wniosków stwierdził m.in., że w zakresie plastycznym przydatność systemu cyfrowej korelacji obrazu została potwierdzona zarówno jako tensometru, jak i w analizie rozwoju stref odkształceń. W zakresie sprężystym dokładność jest niewystarczająca. Niewystarczająca jest także teoria sprężysto-plastyczności małych odkształceń do modelowania wybożenia, tj. w zadaniach z dużymi obrotami. Można wtedy stosować model sprężysto-plastyczności metali systemu *Abaqus*, w którym zaimplementowana jest teoria umiarkowanie dużych deformacji. W tej teorii tensory małych odkształceń zastąpione są przez logarytmy lewego tensora wydłużenia Cauchy'ego.

W zestawieniu z powłokowymi elementami skończonymi teoria ta jakościowo i ilościowo przewiduje zachowanie obserwowane w eksperymentach w sposób poprawny. Doktorant przedstawił także propozycje tematów, stanowiących kontynuację lub rozwinięcie zagadnień podjętych w rozprawie.

Po ostatnim, szóstym rozdziale Doktorant dołączył trzy 50-stronicowe załączniki.

Załącznik A zawiera wyniki obliczeń modułu Younga, granic proporcjonalności i plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie wraz z opracowaniem statystycznym.

Załącznik B to wykresy przemieszczeń uzyskanych za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu oraz obliczonych na ich podstawie odkształceń logarytmicznych wzdłuż wybranych przekrojów dla kolejnych klatek nagrania (w skali czasu).

Załącznik C to wykresy przemieszczeń i odkształceń logarytmicznych uzyskanych za pomocą tzw. analizy geometrycznie nieliniowej systemu metody elementów skończonych *Abaqus* w ramach teorii sprężysto-plastyczności dużych deformacji bez narzuconych imperfekcji oraz przy pełnym utwierdzeniu.

Podsumowując, należy podkreślić, że rozprawa stanowi obszerne studium doświadczalno-numeryczne nośności i stateczności stalowych, cienkościennych elementów perforowanych, które Doktorant realizował przez szereg lat. Można ją zaliczyć do dziedziny mechaniki konstrukcji cienkościennych zarówno prętowych, jak i powłokowych, w której szczególną uwagę zwraca się na relacje konstytutywne sprężysto-plastyczności izotropowych metali. Jest napisana poprawnym językiem technicznym, właściwym opracowaniem naukowym. Na podkreślenie zasługuje jej wyjątkowo estetyczna i przejrzysta szata graficzna.

3. Ocena rozprawy

Znaczenie i aktualność podjętego problemu badawczego jest duża i o praktycznym zastosowaniu. Próbkę zostały wycięte ze stalowych słupów używanych do budowy konstrukcji nośnej wysokich regałów magazynowych, których okrągłe i trapezowe perforacje stanowią montażowe otwory technologiczne, pozwalające na szybki montaż półek i wzmacniających zastrzałów. Regały są stosowane dość powszechnie, a metody projektowania są przemilczane w normach branżowych. W rozprawie Doktorant właściwie zapoczątkował prace nad uwzględnieniem elementów prętowych z perforacjami w normalizacji konstrukcji metalowych.

Przyjęte metody badawcze są poprawne i zgodne z aktualnym stanem wiedzy. Rozprawa zawiera obszerne badania eksperymentalne na elementach z jednorodnymi i niejednorodnymi polami naprężenia i odkształcenia, które Doktorant przeprowadzał na bardzo wysokim poziomie, z zachowaniem należytej staranności zarówno podczas badania, jak i opracowując wyniki. Poza identyfikacją właściwości materiałowych, część badań miała na celu weryfikację stosowanych sformułowań teorii sprężysto-plastyczności. Doktorant wykorzystał nowoczesny system optycznej korelacji obrazu, chociaż w uzupełnieniu stosował klasyczne metody pomiarowe z elektromechanicznymi tensometrami i czujnikami indukcyjnymi. Cyfrowy system optycznej korelacji obrazu umożliwia rejestrację pól przemieszczeń, co pozwala na śledzenie koncentracji odkształceń w wybranych podobszarach elementów perforowanych, a także na porównanie z symulacjami numerycznymi uzyskanymi za pomocą metody elementów skończonych.

Do oryginalnego rozwiązania problemu naukowego rozprawy należy zaliczyć wyniki badań doświadczalnych. Na szczególne podkreślenie zasługuje ich prezentacja oraz opracowanie statystyczne, zwłaszcza zastosowanie języka programowania wysokiego poziomu do automatyzacji zbierania wyników pomiarowych i ich końcowego opracowania w atrakcyjnej formie graficznej - systemu *LAB-view*. Przy ograniczonych środkach techniczno-finansowych Doktorant przygotował i przeprowadził ciekawe badania, osiągnął większość założonych celów badawczych, wykazał się dużą umiejętnością konstruowania oprzyrządowanych stanowisk pomiarowych. Wykazał, że systemy optycznej korelacji obrazu i automatycznego opracowania wyników, pozwalają na dość szybkie i wygodne pozyskanie informacji trudnych do uzyskania innymi metodami, tworzą nowoczesne i przyszłościowe środowisko badawcze, przydatne zarówno w analizie modeli sprężysto-plastyczności materiałów, jak i w projektowaniu elementów konstrukcji.

Do oryginalnych rozwiązań naukowych rozprawy należy również zaliczyć numeryczne symulacje badań doświadczalnych. Doktorant przeprowadził szereg symulacji za pomocą metody elementów skończonych. Wykorzystał sformułowanie teorii sprężysto-plastyczności małych odkształceń oraz teorii dużych deformacji. Ściskane elementy powłokowe znacznie się deformują, przez co nadają się do weryfikacji przydatności i dokładności różnych sformułowań teorii sprężysto-plastyczności, co stanowi podstawowy cel rozprawy. Doktorant badał w symulacjach wpływ modelowania konstytutywnego, warunków brzegowych oraz imperfekcji kształtu. Porównał wyniki symulacji i doświadczeń, co pozwoliło na wykazanie poprawności weryfikowanej teorii.

Należy podkreślić, że rozprawa jest nie tylko materiałem źródłowym dla publikacji naukowych Doktoranta i z tego powodu jej tematyka powinna być kontynuowana. Może ona również stanowić źródło oryginalnych i dobrze opracowanych wyników doświadczalnych, na podstawie których możliwa jest weryfikacja przyszłościowych teorii.

4. Podsumowanie

Rozprawa Pana mgra inż. Andrzeja Piotrowskiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Doktorant zaprezentował ogólną wiedzę teoretyczną i odpowiedni warsztat naukowy, zwłaszcza w obszarze badań eksperymentalnych. Wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W moim przekonaniu rozprawa spełnia w wystarczającym stopniu wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim według obowiązującej ustawy o stopniach naukowych wraz z jej uaktualnieniami.

Wniosuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do obrony.

Leszek Matyjasz