

Prof. dr hab. inż. Paweł Kłosowski
Katedra Mechaniki Budowli
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, dnia 15 maja 2017r.

Opinia

o pracy doktorskiej pt. „Analiza doświadczalna i numeryczna paneli warstwowych z okładzinami z płyty cementowo-magnezjowej i rdzeniem z polistyrenu ekspandowanego” napisanej przez mgr inż. Łukasza Smakosza, dla Rady Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska prof. dr hab. inż. Krzysztofa Wilde z dnia 24 kwietnia 2017 i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Smakosza pt. „Analiza doświadczalna i numeryczna paneli warstwowych z okładzinami z płyty cementowo-magnezjowej i rdzeniem z polistyrenu ekspandowanego”.

2. Omówienie pracy

Opiniowana praca zawiera 236 stron, 330 rysunków i wykresów, 101 tabel i 89 pozycji bibliografii (łącznie z pozycjami normowymi). Składa się z opisu rozprawy, dwu streszczeń (polskiego i angielskiego), spisu oznaczeń i skrótów, czterech rozdziałów, spisu cytowanej literatury, listy prac własnych Doktoranta oraz załącznika ze szczegółowymi wynikami badań laboratoryjnych. Praca jest napisana w języku polskim.

Pierwszy rozdział stanowi wstęp do pracy zawierający opis budowy badanych paneli, krótką prezentację dotychczasowych metod stosowanych w obliczeniach wytrzymałościowych takich elementów konstrukcyjnych oraz cel prowadzonych badań. Jest nim doświadczalne zbadanie składników, z których zbudowany jest panel (i ustalenie na tej podstawie podstawowych parametrów wytrzymałościowych), poddanie próbom obciążenia w warunkach laboratoryjnych kompletnych paneli, przeprowadzenie symulacji numerycznych przeprowadzonych prób z wykorzystaniem zidentyfikowanych parametrów materiałowych i porównanie wyników laboratoryjnych i numerycznych. Idea pracy sprowadza się do jej tezy:

Na bazie odpowiednio przeprowadzonych badań w małej skali, na próbkach użytych materiałów, możliwe jest zbudowanie modelu obliczeniowego umożliwiającego wstępną analizę projektu pełnowymiarowego panelu CISP.

Rozdział drugi pracy poświęcony jest próbom laboratoryjnym. Autor prezentuje najpierw zestaw badań wykonanych na fragmentach paneli. Głównym celem tych badań jest ustalenie fizycznego zachowania się rdzenia panelu, jego okładzin i w konsekwencji dobranie modeli konstytutywnych możliwych do zastosowania w analizie numerycznej i identyfikacja parametrów tych modeli. W drugiej części tego rozdziału autor przechodzi do ściskania całych paneli w warunkach przyłożenia siły w ich płaszczyźnie środkowej, a także na mimośrodku w stosunku do powierzchni środkowej. Badania finalizuje próba zginania paneli poddanych obciążeniu prostopadłemu do płaszczyzny środkowej. Rozdział ten kończą wnioski odnośnie wykonanych prób.

Trzeci rozdział rozprawy to prezentacja wyników analizy numerycznej wykonanej przez Autora za pomocą komercyjnego oprogramowania ABQUS wzbogaconego o autorską procedurę modyfikującą typowe modelowanie konstytutywne. Przedmiotem analizy jest numeryczna symulacja wcześniej przeprowadzonych prób laboratoryjnych, zarówno tych w małej skali jak i w skali naturalnej. Rozdział ten rozpoczyna się od przedstawienia założeń przyjętych w trakcie obliczeń. Potem przedstawiono modele numeryczne stosowane przez innych badaczy paneli kompozytowych. Na tym tle pokazano własny sposób modelowania poszczególnych doświadczeń. W zdecydowanej większości zdecydowano się na przyjęcie schematu pracy układu pracującego w płaskim stanie naprężenia (PSN), a próby zginania paneli modelowano także za pomocą elementów bryłowych i powłokowych. Tam gdzie jest to istotne w modelach uwzględniano także elementy podporowe traktowane jako niepodatne elementy oddziaływujące na próbki za pomocą zjawiska kontaktu. Analizę rozpoczęto od badania jakości siatki elementów skończonych poprzez zmianę jej gęstości. W zdecydowanej większości przypadków analiza ta prowadzi do wniosku, że przyjęta przez Autora nawet najrzadsza siatka elementów jest dostatecznie gęsta do uzyskania poprawnych wyników analizy. Następnie porównano wyniki analizy prowadzonej w zakresie małych przemieszczeń oraz z uwzględnieniem geometrycznej nieliniowości. Autor dochodzi tu do ważnego wniosku, że geometryczna nieliniowość jest istotnym aspektem zachowania się paneli warstwowych z miękkim rdzeniem (szczególnie w ocenie szczegółowej), mimo że przyjęcie założenia o małych przemieszczeniach skutkuje otrzymanie dobrej zgodności z wynikami przeprowadzonych prób laboratoryjnych, jeśli chodzi o ogólną ocenę zachowania się paneli.

Przedstawione w dalszej kolejności wyniki symulacji numerycznych prób laboratoryjnych wskazują, że najistotniejszą częścią budowy modelu numerycznego jest odpowiednie opisanie praw fizycznych rządzących zachowaniem się rdzenia i okładzin. Z lektury pracy można wywnioskować, że nie wszystkie analizowane modele konstytutywne prowadziły do pozytywnych rezultatów (zgodności wyników numerycznych z doświadczalnymi). Dlatego podejmowano próby rozbudowywania modelu konstytutywnego oraz stosowania różnych właściwości materiałowych w zależności od położenia konkretnego elementu skończonego w modelu. Generalnie ograniczono się do przyjęcia założenia o sprężystym zachowaniu się obu składników paneli. Jednak w ostatniej sekcji tego rozdziału podjęto próbę zastosowania modelu sprężysto plastycznego ze wzmocnieniem. Ponieważ w tym bardziej złożonym modelu konstytutywnym pojawia się większa liczba parametrów materiałowych, niestety nie udało się części z nich określić na podstawie przeprowadzonych badań i wyznaczano je na podstawie danych zaczerpniętych z literatury. Uzyskane w ten sposób wyniki dobrze wpisują się w wyniki prób laboratoryjnych. Dodatkowo podjęto tu próbę ustalenia mechanizmów zniszczenia paneli. Uzyskaną w tym przypadku zgodność udało się uzyskać pod warunkiem jeszcze większego rozbudowania modelowania konstytutywnego. Kluczowym elementem zapewniającym zgodność wyników numerycznych z wynikami laboratoryjnymi w skali naturalnej było zbudowanie przez Autora procedury numerycznej dostosowującej właściwości materiałowe od stanu naprężenia panującego w elemencie. Ta napisana w języku Fortran procedura stanowi istotne osiągnięcie Doktoranta. Takie możliwości dają tylko najbardziej zaawansowane komercyjne systemy analizy metodą elementów skończonych (np. ABAQS, MSC.Marc), a umiejętność wykorzystania tej możliwości wymaga znacznego nakładu pracy, ale skutkuje możliwością uzyskania bardzo wartościowych wyników.

Rozprawę kończy podsumowanie, w którym znalazły się też plany dalszej pracy nad podjętym tematem.

3. Ogólna ocena pracy

Należy podkreślić, że autor nie przyjął najprostszego schematu realizacji pracy, w którym jedynym elementem byłyby wyniki numeryczne. Próba przeprowadzenia testów laboratoryjnych wymagała odpowiedniego przygotowania doświadczeń, ich przemyślenia i w końcu czasochłonnego wykonania. Praca wskazuje na całościowe podejście do tematu. Badania w małej skali mają dostarczyć danych do identyfikacji parametrów konstytutywnych, próby zginania i ściskania paneli są istotne ze względu na możliwość stosowania paneli w budownictwie i ich wyniki mogą być podstawą do oceny przydatności konkretnego panelu do

produkcji i eksploatacji. Takie próby są zresztą wymagane przez odpowiednie normy. Przeprowadzona analiza numeryczna prób w małej skali stanowi podstawę weryfikacji jakości przyjętego modelu konstytutywnego i identyfikacji parametrów. Symulacje prób pracy paneli w zamyśle Autora miały stanowić częściową alternatywę dla kosztownych prób laboratoryjnych, jednak zdaje on sobie sprawę (co wynika z odpowiednich stwierdzeń w treści rozprawy), że wymagania normowe prób laboratoryjnych powodują, że analizy numeryczne nie mogą ich w pełni zastąpić. Na szczególne wyróżnienie zasługują wykonane przez Autora analiza statystyczna wyników prób laboratoryjnych. Nie ogranicza się ona do wyznaczania wartości średnich czy odchylenia standardowego, ale jest znacznie pogłębiona (mimo ich czasami wątpliwości muszą budzić jej rezultaty ze względu na liczebność prób). Należy też podkreślić, że badany materiał jest trudnym do badań ze względu na znaczne rozrzuty właściwości poszczególnych paneli i ich elementów składowych. Trudność sprawia także sama geometria panelu, a w szczególności jego znaczna grubość mająca duży wpływ na kształt wycinanych próbek, sposób wycinania, zamocowania próbek w trakcie prób itp. Pomoc stanowią tu wymagania normowe, ale często ze względu na wyposażenie laboratorium trudno jest je dochować. Z lektury rozprawy wynika, że zna on wszystkie aspekty wykonywanych prób i aktywnie w nich uczestniczył, co nie zawsze jest praktykowane. Recenzent zdaje sobie sprawę z faktu, że próby były wykonywane kilka lat temu, że była ograniczona liczba paneli możliwych do wykorzystania w badaniach i że nie zawsze była możliwość przeprowadzenia prób w odpowiedniej liczbie oraz kolejności.

Próby laboratoryjne przeprowadzono na dwóch stanowiskach. Do prób w małej skali użyto maszyny wytrzymałościowej INSTRON o maksymalnym obciążeniu 50 kN, z rejestracją wyników za pomocą komputera. W celu przeprowadzenia części badań zaprojektowano i wykonano autorskie systemy mocowania próbek. Podobnie próby paneli w skali naturalnej wymagały zaprojektowania i wykonania specjalnego systemu zamocowania. Próby te były przeprowadzone w Laboratorium Wydziału Oceanologii i Okrętownictwa PG posiadającym odpowiednie stanowisko umożliwiające obciążenie dużych elementów za pomocą odpowiednich siłowników hydraulicznych sterowanych komputerowo. Rejestrowanie przemieszczeń poprzecznych i podłużnych paneli wykonywano za pomocą czujników przemieszczeń, a odkształcenia mierzono tensometrami. Takie zaplanowanie badań pozwalało na uzyskanie z badania pojedynczego panelu dużej liczby danych pomiarowych.

Przechodząc do oceny części numerycznej pracy należy podkreślić staranność wykonanych analiz. W obliczeniach zbadano zbieżność wyników ze względu na gęstość

siatki elementów skończonych, wpływ geometrycznej nieliniowości itp. Najistotniejszym elementem analizy numerycznej było odpowiednie modelowanie konstytutywne. Przy tak złożonym charakterze modelowanej konstrukcji poprawne wykonanie tej części analizy ma podstawowe znaczenie. Autor wykazał się umiejętnością zastosowania różnych modeli począwszy od najprostszych (liniowo sprężystych), poprzez modele sprężysto plastyczne ze wzmocnieniem a kończąc na zbudowaniu procedury dobierającej automatycznie wartości parametrów materiałowych w zależności od stanu naprężeń w elemencie. W ocenie recenzenta ta część pracy jest dojrzała i na wysokim poziomie.

Końcowe wnioski, jakimi kończy się rozprawa obarczone są znacznym stopniem niepewności. Wynika to z niejednorodności próbek, małej liczby prób, przeprowadzania prób na panelach pochodzących z różnych faz przygotowania do produkcji (w tym panele wyprodukowane jako prototypowe). Niestety na niepewność wniosków rzutuje też: sposób w jaki zostały przeprowadzone niektóre badania, sposób zamocowania próbek w czasie badań, liczebność prób a także pewne założenia obliczeniowe. Dlatego uzyskane wyniki wymagają potwierdzenia poprzez dalsze badania lub porównanie ich z wynikami innych autorów (tego elementu w pracy nie ma).

4. Uwagi krytyczne

4.1. Uwagi ogólne

- a) Zdecydowano się na przeprowadzenie różnych rodzajów prób w małej skali. Ich celem było wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych materiału rdzenia i okładzin. Niestety trudno znaleźć myśl przewodnią w doborze tych prób. Próby powinny mieć na celu wyznaczenie konkretnego parametru materiałowego i dlatego warunki ich przeprowadzenia powinny minimalizować wpływ innych czynników. Na podstawie prób wstępnych i danych z literatury można było się zorientować, jakie modele konstytutywne powinny być zastosowane do modelowania rdzenia i okładzin. Próby powinny więc być dopasowane do wyznaczenia tych parametrów. Na przykład: czemu miały służyć próby trójpunktowego zginania rdzenia skoro przeprowadzono próby jednoosiowego ściskania i rozciągania rdzenia? Podobne wątpliwości dotyczą też badania okładziny? Do czego miały służyć badania ściskania paneli o pocienionym rdzeniu? Takie panele w rzeczywistości w ogóle pojawiają się.

- b) W rozprawie w wielu miejscach nie podano dokładnie sposobu wykonania prób. Nigdzie nie ma informacji o tym, czy stosowano obciążenie wstępne. W próbach zginania próbek CSIP nie podano sposobu ani prędkości przykładania obciążenia. W przypadku ściskania próbek z pocienionym rdzeniem nie wiadomo, czy po wycięciu części rdzenia obie połówki skleiono (jak?), czy też nie.
- c) Dlaczego w próbach ściskania próbek CSIP na sztorc stosowano specjalne podpory uniemożliwiające swobodę odkształceń w tym rejonie (normy tego nie przewidują!)? Dlaczego stosowano podkładki z płyty pilśniowej lub zamocowanie za pomocą zaprawy zamiast zastosować odpowiednio zwiększoną siłę wstępną lub odrzucić początkową fazę deformacji próbki?
- d) Wątpliwości budzi sposób wyznaczenia modułu sprężystości dla rdzenia na podstawie prób ściskania i rozciągania. W próbach ściskania badany jest rdzeń razem z okładzinami (dlaczego?). W próbach rozciągania pozostawienie okładzin można uzasadnić (lepszą możliwość zamocowania próbek), ale wykonanie prób bez ekstensometru (lub innego lokalnego sposobu pomiaru przemieszczeń) powoduje, że wyniki są obarczone dużym błędem.
- e) Wbrew wymaganiom normowym w próbach trójpunktowego i czteropunktowego zginania stosowano także próbki, których długość była bardzo mała w stosunku do grubości. Wyniki takich prób obarczone są dużym błędem. W próbach czteropunktowego zginania wbrew zaleceniom normowym nie stosowano pomiaru przemieszczeń środka panelu (np. za pomocą ekstensometru), a ograniczono się tylko do pomiaru przemieszczenia trawersy. W tej sytuacji wątpliwe są wartości parametrów wyznaczanych na podstawie takich prób. Dotyczy to także prób trójpunktowego zginania rdzenia, w mniejszym stopniu trójpunktowego zginania okładzin, gdzie można założyć, że przemieszczenie trawersy jest równe przemieszczeniu próbki w środku długości.
- f) O ile bardzo dokładnie przeprowadzono analizę statystyczną wyników, to sposób wyznaczenia parametrów materiałowych pozostawia duży niedosyt. Autor nie stosuje w ogóle metody najmniejszych kwadratów, która jest powszechnie stosowanym narzędziem w tej sytuacji. Wyznacza wartości modułu sprężystości na podstawie zbliżonych do prostoliniowych fragmentów wykresów naprężenie-odkształcenie biorąc pod uwagę tylko skrajne wartości tych fragmentów funkcji, pomija więc wszystkie punkty pośrednie. Traci też możliwość ustalenia stopnia korelacji funkcji

otrzymanej w wyniku regresji z funkcją z badań. Recenzent zgadza się z tym, że wyniki otrzymane w pracy będą zbliżone do tych, jakie można by otrzymać stosując regresję dla tych samych fragmentów funkcji, ale nie zastosowanie metody najmniejszych kwadratów wskazuje na braki warsztatowe w tej dziedzinie.

- g) W czasie badań należy raczej przestrzegać wymagań normowych, co do sposobu przeprowadzania prób. Dotyczy to w szczególności wymiarów próbek, prędkości przeprowadzania prób, wstępnego obciążenia itp. Odstępstwa od tych uregulowań należy szczegółowo uzasadnić. Nie należy robić takich odstępstw w sytuacji, gdy liczba próbek jest bardzo ograniczona, a tak kilkukrotnie postąpiono.
- h) Nie można mówić o wartościach parametrów materiałowych dla różnych rodzajów prób. Na podstawie pracy można się zgodzić, że materiał rdzenia ma dwie różne wartości modułu sprężystości przy ściskaniu i rozciąganiu lub że zależy od gęstości rdzenia. Niestety autor nie przeprowadził prób rozciągania materiału okładzin i trudno w tej sytuacji wysnuć podobny wniosek o materiale okładziny. Występowanie w nim siatki z tkanin wskazuje jednak, że takie zróżnicowanie raczej tam także występuje, a dodatkowo może pojawić się zjawisko ortotropii właściwości w płaszczyźnie okładziny (różny stopień napięcia siatek w kierunku podłużnym i poprzecznym zaobserwowany przez Autora). Autor na podstawie różnych prób uzyskał różne WARTOŚCI tego samego modułu sprężystości. Niestety świadczy to o niezbyt dobrze dobranym rodzaju prób, zbyt małej liczbie próbek, niejednorodności badanego materiału lub niezbyt dobrze dobranej metodologii identyfikacji. Zdaniem recenzenta jest to największy mankament pracy, choć może być spowodowany czynnikami niezależnymi od Autora. W tej sytuacji trzeba uznać sprawę ustalania wartości parametrów sprężystych paneli za niewyjaśnioną do końca i stwierdzić, że potrzebne jest kontynuowanie badań w tym kierunku.
- i) Trudności w ustaleniu parametrów materiałowych znalazły niestety odbicie w numerycznej części pracy. Widać, że Autor ma problemy z uzyskaniem zgodności wyników numerycznych z doświadczalnymi. Musi stosować cały szereg dodatkowych założeń, aby taką zgodność uzyskać. Niestety i tu w celu porównania krzywych doświadczalnych i uzyskanych z analizy numerycznej nie stosuje obiektywnych miar porównania jak współczynnik korelacji lub determinacji.

- j) Na jakiej podstawie Autor zdecydował się na zastosowanie modelu sprężysto plastycznego ze wzmocnieniem zamiast np. nieliniowo sprężystego? Przeprowadzone próby nie uzasadniają takiego wyboru.

Przestawione powyżej uwagi tylko w pewnym stopniu odnoszą się do jakości otrzymanych wyników. Ich celem jest pokazanie autorowi, co należałoby w zmienić w sposobie prezentacji pracy (lub jej późniejszej publikacji) i na jakie elementy należy położyć szczególny nacisk przystępując do jej obrony i planując dalsze badania.

4.2. Uwagi szczegółowe

- a) W badaniach małej skali była stosowana maszyna wytrzymałościowa napędzana silnikiem krokowym, nie ma więc w niej układu hydraulicznego, a co za tym idzie nie można mówić o „przemieszczeniu tłoka” - poprawne jest natomiast sformułowanie „przemieszczenie trawersy”.
- b) W pracy kilkakrotnie użyto sformułowania „w oparciu”, które jest niepoprawne. Należy je zastąpić np. „na podstawie”, „bazując” lub podobnym.
- c) trudności sprawia analiza wykresów przemieszczeń paneli poddanych ścisaniu osiowemu i mimośrodowemu. Na jednych wykresach przemieszczenie panelu w górę oznaczono jako dodatnie, a na innych dodatnie jest przemieszczenie w dół.
- d) Nie wiadomo, czy w symulacjach numerycznych badań całych paneli uwzględniano ciężar własny panelu, a czy w próbach uwzględniano wstępne ugięcie paneli od ciężaru własnego. Tego problemu w pracy nie poruszono.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Oceniając całą pracę należy stwierdzić, że jej poziom jest wysoki. Bardzo dobra jest redakcja. Praktycznie nie ma błędów ortograficznych czy gramatycznych. Wykresy są czytelne, a załącznik zawiera wyniki prawie wszystkich przeprowadzonych prób. Dobrą jest idea prezentacji wyników w pracy na podstawie próby referencyjnej (jednej z tych przedstawionych w załączniku) i ciekawy sposób wyboru tej próby. Praca składa się z dwóch części (doświadczalnej i numerycznej), z których na zdecydowanie wyższym poziomie jest ta druga. Niedostatki części doświadczalnej nie zawsze wynikają z niedoświadczenia badacza. Recenzent zdaje sobie sprawę, że niektóre uwagi były spowodowane czynnikami obiektywnymi, niezależnymi od Autora i były trudne do uniknięcia. Na szczególne podkreślenia zasługuje fakt, że doktorant podjął jednak trud połączenia części laboratoryjnej i numerycznej. Świadczy to o jego głębokiej znajomości tematu (szczególnie po przeprowadzonych seriach badań!). Można przypuszczać, że badania panel prowadzone w

dalszym ciągu z jego udziałem pozwolą usunąć dużą część niedostatków uzyskanych dotychczas wyników. Reasumując, stwierdzam więc, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. nr 65 poz. 595 – późniejszymi zmianami) i dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Łukasza Smakosza do publicznej obrony pracy.

Prof. dr hab. inż. Paweł Kłosowski

A handwritten signature in black ink, reading "Paweł Kłosowski". The signature is written in a cursive, slightly slanted style.