

Poznań, dnia 24 maja 2017 r.

Dr hab. inż. Zbigniew Pozorski
Instytut Konstrukcji Budowlanych
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 5
60-965 Poznań

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Łukasza Smakosza pt.:

„Analiza doświadczalna i numeryczna paneli warstwowych z okładzinami z płyty cementowo-magnezjowej i rdzeniem z polistyrenu ekspandowanego”

Promotor: dr hab. inż. Ireneusz Kreja, prof. nadzw. PG

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej z dnia 24.04.2017 r.

1. Ogólna charakterystyka tematyki rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Łukasza Smakosza są panele strukturalne składające się z okładzin z płyt cementowo-magnezjowych (MgO) wzmocnianych włóknem szklanym oraz z rdzenia z polistyrenu ekspandowanego (EPS). Ten produkt jest od niedawna wprowadzany na rynek europejski. Płyty MgO charakteryzują się wysoką trwałością, odpornością na ogień i niewielką wrażliwością na korozję biologiczną. Poza tym, rozpatrywane panele posiadają wszystkie cechy płyt warstwowych (m.in. wysoką nośność przy niewielkim ciężarze i doskonałą izolacyjność termiczną).

Ze względu na innowacyjność paneli z okładzinami wykonanymi z MgO, wymagają one gruntownych badań. Rozprawa Pana mgra inż. Łukasza Smakosza składa się z dwóch zasadniczych części. Jedną z nich są badania laboratoryjne zmierzające do poznania właściwości produktu i jego składowych. Druga część przedstawia proces tworzenia modelu numerycznego prawidłowo opisującego zachowanie się analizowanych paneli. Stworzenie

wiarygodnego modelu numerycznego jest bardzo istotne z co najmniej dwóch powodów. Po pierwsze symulacje numeryczne mogą ograniczyć koszt licznych badań laboratoryjnych. Po drugie, i chyba najważniejsze, prawidłowo przeprowadzony eksperyment numeryczny pozwala wyjaśnić zjawiska, które nie są możliwe do identyfikacji na podstawie stosowanego w praktyce pomiaru zaledwie kilku przemieszczeń i odkształceń. Z tego powodu przedmiot i zakres przedstawionej rozprawy należy uznać za wysoce uzasadniony.

2. Zawartość rozprawy

Recenzowana praca Pana mgr inż. Łukasza Smakosza składa się z czterech rozdziałów, wykazu oznaczeń i skrótów, wykazu literatury i własnych publikacji, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz trzech załączników, w których przedstawiono szczegółowe wyniki badań doświadczalnych. Rozprawa liczy 236 stron.

Rozdział 1 jest rozdziałem wstępnym, w którym przedstawiono ogólną charakterystykę paneli warstwowych, przegląd metod obliczania konstrukcji warstwowych, opis paneli poddanych analizie oraz cel i zakres pracy. We wstępie sformułowano tezę pracy o następującej treści: „Na bazie odpowiednio przeprowadzonych badań w małej skali, na próbkach użytych materiałów, możliwe jest zbudowanie modelu obliczeniowego umożliwiającego wstępną analizę projektu pełnowymiarowego panelu CISP”.

W rozdziałach 2 i 3 przedstawione są oryginalne rezultaty badań Autora. Rozdział 2 zawiera wyniki badań doświadczalnych wykonanych na próbkach w małej skali oraz w skali naturalnej. Badane były zarówno materiały będące częściami składowymi panelu (płyty magnezjowe, polistyren ekspandowany), jak również kompletne panele. Autor rozprawy szczegółowo uzasadnił program badawczy oraz omówił parametry przeprowadzonej analizy statystycznej. Część badań wykonano w nawiązaniu do Wytycznych do Europejskich Aprobac Technicznych ETAG 016. Rdzeń polistyrenowy był rozciągany, ściskany i zginany. Okładziny wykonane z MgO były poddane ściskaniu na sztorc oraz trójpunktowemu zginaniu. Wyniki badań własnych zostały porównane z wartościami uzyskanymi ze wzorów teoretycznych zaczerpniętych z literatury. Nieduże próbki kompozytowe (okładziny wraz z rdzeniem) były ściskane na sztorc, zginane trójpunktowo oraz zginane czteropunktowo. Panele jednoprzęsłowe o wymiarach stosowanych w praktycznych zastosowaniach były zginane lub ściskane mimośrodowo. W przypadku ściskania zastosowano trzy różne poziomy mimośrodu przyłożonego obciążenia. Wyniki wszystkich testów zostały szczegółowo przeanalizowane, a zaobserwowane relacje (w tym również pewne niezgodności pomiędzy wynikami) zostały wyjaśnione. Najpoważniejsze

rozbieżności pomiędzy poszczególnymi wynikami testów laboratoryjnych zostały wyjaśnione za pomocą eksperymentów numerycznych.

W Rozdziale 3 przedstawiono proces poszukiwania modelu numerycznego prawidłowo opisującego zachowanie się badanych paneli warstwowych z okładzinami cementowo-magnezowymi. Wszystkie modele numeryczne przygotowano za pomocą programu Abaqus. Po ustaleniu geometrii i warunków brzegowych, Autor przeprowadził analizę zbieżności mającą na celu określenie minimalnej gęstości siatek elementów skończonych. Następnie rozpatrzona została kwestia wpływu nieliniowości geometrycznej. Po wstępnym porównaniu wyników numerycznych z doświadczalnymi, Autor wprowadził w analizowanych modelach numerycznych zależność parametrów materiałowych od stanu naprężenia. Pan mgr inż. Łukasz Smakosz stworzył procedurę, która każdemu punktowi całkowania modelu przypisuje w każdym przyroście wartość zmiennej stanu f_{σ} określaną na podstawie wartości naprężeń głównych. Od tej zmiennej stanu jest uzależniona wartość modułu sprężystości przyjęta w dalszych obliczeniach. Po uzgodnieniu wyników w zakresie sprężystym, Autor wprowadził opis materiałów w zakresie niesprężystym, który jest oparty na teorii plastyczności. Ostatecznie, dla materiału okładziny i rdzenia zdecydowano się na zastosowanie kryterium uplastycznienia Druckera-Pragera w wersji hiperbolicznej ze wzmocnieniem izotropowym. Utrzymana została zależność parametrów materiałowych od wartości zmiennej stanu f_{σ} . W celu obserwacji uszkodzenia modelu zastosowano kryterium inicjacji zniszczenia ciągliwego kompatybilne z modelem Druckera-Pragera, a parametry prowadzące do zniszczenia zostały również uzależnione od zmiennej stanu f_{σ} . Zastosowane podejście pozwoliło uzyskać zadowalającą zgodność wyników numerycznych z kompletem badań laboratoryjnych.

W Rozdziale 4 przedstawione zostały wnioski końcowe i plan dalszych prac. Autor podkreślił dobrą zgodność krzywych siła-przemieszczenie uzyskanych w symulacji komputerowej z wynikami laboratoryjnymi. Zauważona też została pewna rozbieżność krzywych naprężenie-odkształcenie. Z analizy przeprowadzonej przez Autora wynika, że najpoważniejszym problemem jest uzyskanie prawidłowej inicjacji uszkodzenia okładzin wykonanych z MgO poddanych rozciąganiu. Pan mgr inż. Łukasz Smakosz określił grupę testów doświadczalnych niezbędną do stworzenia prawidłowego modelu numerycznego panelu warstwowego oraz uzasadnił tezę sformułowaną na początku rozprawy.

3. Uwagi ogólne

Rozprawa Pana mgr inż. Łukasza Smakosza dotyczy samonośnych, konstrukcyjnych paneli kompozytowych z okładzinami cementowo-magnezjowymi. Okładziny cementowo-magnezjowe są nowoczesnym produktem stopniowo wprowadzanym na rynek. Analizowane panele należą do szerokiej grupy materiałów kompozytowych zarówno z powodu swojej struktury, jak również z powodu kompozytowego charakteru samych okładzin. Badania prowadzone w kierunku prawidłowego opisu zachowania się paneli i wyjaśnienia mechanizmów zniszczenia są naukowo aktualne oraz ważne z aplikacyjnego punktu widzenia. Z tego powodu, zarówno przedmiot rozprawy, jak również jej zakres są bardzo uzasadnione.

Autor rozprawy wykonał szereg badań doświadczalnych paneli z okładzinami MgO. Niektóre z uzyskanych wyników wydawały się niespójne, lecz dzięki przeprowadzonym eksperymentom numerycznym i konsekwentnej poprawie opracowanego modelu numerycznego, Autor uzyskał dobrą zgodność wyników laboratoryjnych i numerycznych. Warto zauważyć, że ze względu na innowacyjny charakter płyt z okładzinami MgO, autor rozprawy prowadził badania na próbkach pochodzących z różnych partii różniących się wybranymi cechami. Nie jest to zarzut, lecz zwrócenie uwagi na często trudne warunki pracy badacza eksperymentatora.

Do oryginalnych osiągnięć Autora rozprawy należy zaliczyć przede wszystkim opracowanie zaawansowanego modelu numerycznego pozwalającego na analizę paneli z okładzinami MgO. Opracowany model uwzględnia zakres sprężysty i niesprężysty zachowania się materiałów, które tworzą panel. Wprowadzone jest również kryterium inicjacji uszkodzenia, które pozwala na identyfikację miejsca jego wystąpienia, i wartości obciążenia, które je wywołuje. Za najbardziej wartościowy należy uznać pomysł powiązania aktualnego stanu materiału z odpowiednimi parametrami materiałowymi. Efekt ten uzyskano dzięki wprowadzeniu zmiennej stanu $f\sigma$ określanej na podstawie wartości naprężeń głównych. Uzależnienie parametrów materiałowych od stanu mechanicznego było niezbędne ze względu na duże różnice pomiędzy parametrami uzyskanymi w badaniach doświadczalnych symulujących różne stany mechaniczne. Pewną wątpliwość budzi sposób przypisania parametrów do odpowiedniego stanu. W celu takiego przypisania należy znać pewien początkowy stan mechaniczny, który przy założeniu pewnego oddziaływania jest zależny od początkowego rozkładu właściwości materiałowych. Mamy więc do czynienia ze sprzężeniem stanu mechanicznego i właściwości materiałowych, a uzyskanie prawidłowej relacji powinno być osiągnięte na drodze iteracyjnej (na każdym kolejnym kroku analizy).

Bardzo ważnym i niezbędnym etapem do stworzenia modelu numerycznego jest wykonanie badań doświadczalnych pozwalających na określenie parametrów materiałowych. Autor rozprawy wykonał bardzo szerokie i wartościowe badania, które pozwoliły nie tylko na zdefiniowanie parametrów modelu, ale również są wartościowym materiałem badawczym dla kolejnych prac naukowych. Dla pewnego porządku, w rozprawie warto byłoby dodać kilka jednoznacznych sformułowań przedstawiających przyjęte założenia. Przede wszystkim, w próbie zginania płyty MgO wyznacza się moduł sprężystości E przy założeniu, że materiał, z którego jest wykonana płyta jest jednorodny i izotropowy. Jak Autor rozprawy sam zauważył, płyta MgO ma inne właściwości podczas ściskania, a inne w trakcie rozciągania. Z tego powodu, przyjęcie tak silnego założenia o jednorodności i izotropii w pewnym sensie obniża wiarygodność uzyskanej wartości modułu sprężystości podczas próby zginania. Nie jest to też wartość średnia w sensie matematycznym. Można ją za to potraktować jako wartość efektywną podczas zginania. Drugim założeniem upraszczającym (choć z pewnością słusznym) było przyjęcie, że na przemieszczenia zginanej i ścinanej belki wykonanej z EPS ma wpływ wyłącznie zginanie, a tego wpływu nie ma ścinanie próbki (wzór 2.12). W rzeczywistości należałoby się bardziej obawiać efektu zgniecia materiału na podporach i w miejscu przyłożenia siły. Efekt ten również jest pominięty.

Pomimo drobnych uwag, reasumując ogólną ocenę rozprawy, uważam, że zaprezentowane w pracy rezultaty stanowią w dużej części oryginalny wkład Autora w zagadnienie analizy paneli warstwowych z podatnym rdzeniem. Do najciekawszych przyszłych planów badawczych Pana mgr inż. Łukasza Smakosza należy zaliczyć wykorzystanie opracowanego modelu do analizy całych konstrukcji wykonanych z rozpatrywanych paneli kompozytowych.

4. Uwagi szczegółowe

Poniżej przedstawiam kilka uwag szczegółowych, które pojawiły się podczas czytania rozprawy.

1. Rozprawa jest napisana starannie, jednak Autor nie ustrzegł się kilku błędów o charakterze edytorskim. Najbardziej rażące jest stosowanie kropki jako separatora dziesiętnego oraz wprowadzanie oznaczeń literowych (a, b, c) części składowych rysunków poniżej rysunku lub po jego prawej stronie.
2. Strona 7 (wykaz oznaczeń i skrótów): Autor zastosował ten sam opis (np. granica proporcjonalności) dla różnych symboli.
3. W próbach zginania polistyrenu nie uwzględniono efektu zgniecia rdzenia na podporach.

4. Strona 30, ostatni akapit: „... wartości granicy proporcjonalności, plastyczności i wytrzymałości są większe dla belek o mniejszych rozmiarach.” Autor obiektywnie przedstawia wynik obserwacji jednocześnie narażając się na uwagę, że cechy materiału nie zależą od długości próbki (pomijając różnice wynikające z efektu skali). W tym przypadku nie można mówić o efekcie skali ponieważ próbki mają albo 650 mm, albo 1300 mm długości. Jeśli uzyskane właściwości materiału różnią się w zależności od rozpiętości, to albo materiał w próbkach jest różny, albo podczas wyznaczania parametrów przyjęto zbyt daleko idące założenia upraszczające.
5. Uważam, że przypisywanie w rozprawie pewnych rozbieżności w wynikach tzw. efektowi skali jest nieco przesadzone.
6. Przy ściskaniu płyty MgO uzyskano wartości modułów prawie niezależne od kierunku ściskania. To wartościowy wynik, który potwierdza, że przy ściskaniu decydują właściwości matrycy, a jest ona z dobrym przybliżeniem izotropowa.
7. Z rysunku 2.42 oraz opisu do tego rysunku nie wynika, w jaki sposób i w którym miejscu był dokonywany pomiar przemieszczeń pionowych.
8. Komentarza wymaga rysunek 2.44, na którym przedstawiono wyniki próby zginania panelu o rozpiętości 1250 mm. Wyniki dla próby trzypunktowego i czteropunktowego zginania są bardzo podobne, co prowadziło do wniosku, że zastosowanie innego schematu statycznego nie ma wpływu na siłę niszczącą.

Powyższe uwagi szczegółowe powinny być, w moim przekonaniu, uwzględnione w planowanych przez Autora publikacjach naukowych. Pragnę podkreślić, że uwagi te nie wpływają na ogólną, pozytywną ocenę rozprawy Pana mgra inż. Łukasza Smakosza.

5. Wnioski końcowe recenzji

Podsumowując recenzję stwierdzam, że Pan mgr inż. Łukasz Smakosz w rozprawie doktorskiej „Analiza doświadczalna i numeryczna paneli warstwowych z okładzinami z płyty cementowo-magnezowej i rdzeniem z polistyrenu ekspandowanego”:

- zrealizował cel i udowodnił tezę rozprawy,
- wykazał się umiejętnością samodzielnej pracy badawczej, znajomością literatury światowej i bogatą wiedzą w dziedzinie badań doświadczalnych i modelowania numerycznego,

- uzyskał oryginalne rezultaty naukowe dotyczące zachowania się paneli warstwowych z podatnym rdzeniem i okładzinami cementowo-magnezowymi,
- opracował zaawansowany model numeryczny służący do symulacji zachowania się paneli kompozytowych poddanych obciążeniom statycznym,
- opracował autorską procedurę powiązania aktualnego stanu mechanicznego materiału z odpowiednimi parametrami materiałowymi, a efekt ten został uzyskany dzięki wprowadzeniu zmiennej stanu f_{σ} określonej na podstawie wartości naprężeń głównych.

Na podkreślenie zasługuje umiejętność Autora do twórczego i konsekwentnego rozwijania wiedzy w zakresie mechaniki konstrukcji, metod doświadczalnych i komputerowych metod analizy.

Recenzowana praca spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

dr hab. inż. Zbigniew Pozorski

Poznań, 24.05.2017 r.