

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**pt. „Nieliniowa analiza żelbetowych konstrukcji powłokowych metodą elementów skończonych uwzględniająca usztywnienie zbrojenia przy rozciąganiu” mgr inż. Sławomira Dudziaka, opracowana na podstawie umowy GF-1131-0059/2019/UDHO.**

### **1. Tematyka rozprawy**

Tematyka rozprawy dotyczy obliczeń w zakresie nieliniowym konstrukcji żelbetowych przy wykorzystaniu aproksymacji metodą elementów skończonych i związanych z tą metodą technik rozwiązywania nieliniowych układów równań. Implementacja komputerowa opracowanych algorytmów dokonana została w komercyjnym powszechnie znanym programie Abaqus.

Recenzent jest zdania, że praca ma istotne znaczenie aplikacyjne i poznawcze w dziedzinie „budownictwo”. Walorem poznawczym pracy jest niewątpliwie opracowanie nowego modelu konstytutywnego dla żelbetu uwzględniającego współpracę betonu i stali. Walory aplikacyjne pracy to implementacja komputerowa opracowanego modelu konstytutywnego, jego weryfikacja oraz przedstawione przykłady obliczeń konstrukcji belki żelbetowej, tarczy żelbetowej oraz obrotowo-symetrycznego zbiornika żelbetowego na podłożu sprężystym.

Walory ekonomiczne pracy związane są z opracowaniem efektywnego algorytmu numerycznego, który pozwala na stosowanie opracowanego modelu konstytutywnego w praktyce inżynierskiej bez stosowania kosztownych w użyciu klastrów HPC.

Walorem społecznym jest możliwe upowszechnienie modelowania nieliniowego konstrukcji żelbetowych w praktyce firm projektowych. Jednak wymaga to popularyzacji, a to z kolei wymaga czasu.



Tytuł rozprawy jest właściwy i dobrze charakteryzuje całość pracy.

## 2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska została podzielona na pięć rozdziałów oraz dodatkowo znajdują się w niej trzy załączniki. W rozdziale pierwszym (Wprowadzenie) Autor przedstawił ogólny stan wiedzy na temat analizy konstrukcji żelbetowych w kontekście głównych tez pracy podanych na końcu rozdziału co zostało poprzedzone krótkim „Słowem wstępnym”, w którym odniósł się krytycznie do aktualnie stosowanych metod analizy konstrukcji żelbetowych wywodzących się z obliczeń wykonywanych na podstawie liniowej teorii sprężystości, a także szeregu uproszczeń takich jak np. stosowanie modeli działających w jednoosiowym stanie naprężenia do modelowania ustrojów działających w złożonych stanach naprężenia.

Recenzent uznał, że warto ten fragment pracy mimo, że jest bardzo krótkim, scharakteryzować ponieważ dobrze określa on sposób myślenia Autora i ma swoje konsekwencje w dalszej części rozprawy oraz zapewne będzie miał istotne konsekwencje dla dalszego rozwoju zawodowego Autora.

Ogólny stan wiedzy został przedstawiony w sposób syntetyczny uwzględniający zarówno trendy w literaturze i nauce światowej jak i osiągnięcia krajowe co stanowi wystarczające tło dla reszty pracy.

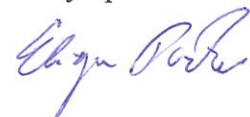
Na zakończenie Autor podaje dwie główne tezy rozprawy:

1) „Spośród wszystkich opracowanych dotąd modeli konstytutywnych betonu, racjonalne w nieliniowej analizie dużych ustrojów konstrukcyjnych z wykorzystaniem komputerów klasy PC, są modele bazujące na związkach nieliniowej sprężystości oraz koncepcji rysy rozmazonej”

2) „Zjawisko współpracy betonu i zbrojenia na odcinku między rysami – tension stiffening – można uwzględnić poprzez modyfikację relacji konstytutywnej stali zbrojeniowej (jednocześnie modelując zachowanie betonu przy rozciąganiu jako kruche) w celu uniknięcia lokalnej niemonotoniczności, skutkującej wydłużeniem czasu realizacji algorytmu przyrostowego.”

Rozdział drugi rozprawy pt. „Przegląd modeli konstytutywnych stosowanych w analizie konstrukcji żelbetowych” stanowi rozszerzenie przeglądu stanu wiedzy analizy konstrukcji żelbetowych na ich modelowanie konstytutywne.

W rozdziale trzecim pt. „Opis proponowanego modelu konstytutywnego” przedstawione zostało rozwinięcie modelu konstytutywnego, który został opracowany przez Autora



rozprawy. Model konstytutywny został opisany jasno i właściwie. Jednak rozdział ten Autor zbyt rozszerzył o opis powszechnie znanej metody BFGS. Opis jej mógł zostać całkowicie pominięty bez szkody dla zawartości pracy (podając referencje) bądź znaleźć się w jednym z załączników.

W rozdziale czwartym pt. "Weryfikacja opracowanego algorytmu" przedstawione zostały przykłady numeryczne, które uwiarygadniają przedstawianą teorię oraz algorytm numeryczny. Autor prowadzi sprawnie czytelnika od sprawdzenia elementarnych przykładów jednoosiowego stanu naprężenia do konstrukcji bardziej złożonych jakimi są belki, tarcze, płyty oraz konstrukcja zbiornika modelowanego jako powłoka obrotowo symetryczna na sprężystym podłożu. Dobór przykładów numerycznych jest przekonujący.

W rozdziale piątym Autor podsumowuje wyniki pracy. Rozdział ten jest w znacznej mierze jej streszczeniem. Na końcu podrozdziału pt. „Wnioski” znajduje się krótkie uzasadnienie postawionych tez. Lepiej by było gdyby uzasadnienie to znalazło się w osobnym podrozdziale.

Autor podaje również kierunki dalszych prac na rozwojem opracowanego modelu.

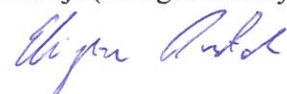
Wszystkie tytuły rozdziałów dobrze oddają zawartą w nich treść. Układ rozprawy jest dobrze przemyślany.

Dalsze uwagi dotyczące rozprawy podane zostały w następnym punkcie i nie umniejszają one podanych wcześniej ocen ogólnych.

### **3. Uwagi ogólne i szczegółowe**

Rozprawa zredagowana jest starannie, a także napisana jest poprawnym, ładnym językiem polskim. Jedynym mankamentem jest bardzo częste wtrącanie do tekstu angielskich terminów mimo utworzenia na początku pracy rodzaju słownika z ich wyjaśnieniami. Niestety jest to zgrzyt podczas czytania ogólnie przecież dobrej rozprawy. W tekście należy podać termin w języku polskim, a później w nawiasie np. (ang. termin angielski). Można też używać skrótów np. dla podanego po raz pierwszy terminu dotyczącego usztywnienia przy rozciąganiu czyli właśnie np. (ang. tension stiffening, TS), a później konsekwentnie tego skrótu używać co Autor np. deklaruje na stronie 35 rozprawy. Jednak niestety w dalszym ciągu tekstu tego skrótu praktycznie nie używa stosując angielski termin w nawiasach bądź też bez nich. Sprawa dotyczy również innych terminów, np. modelu rysy rozmazanej.

W przeglądzie stanu wiedzy w rozdziale 1.2 znajduje się kilka uwag na temat kosztu obliczeń wykonywanych na klastrach HPC. Jest to prawdą, czasy obliczeń są długie, koszt też dość wysoki z uwagi na koszt używanych komputerów i ich eksploatacji (energia elektryczna,



chłodzenie). Jednak istnieje od pewnego czasu rozwiązanie umożliwiające prowadzić obliczenia równoległe na instalacjach znacznie tańszych, a mianowicie kartach GPU (ang. Graphical Processing Unit), np. NVIDIA. Opracowane zostały wersje języków programowania do tworzenia programów z ich użyciem. Ponadto istnieją już wersje programów komercyjnych np. program Abaqus posiada możliwość ich wykorzystania. Obniża to znacznie koszty prowadzenia obliczeń i pewne niedogodności związane z wykonywaniem obliczeń zdalnie w wyspecjalizowanych centrach obliczeniowych. Zresztą niedogodności te są coraz mniejsze w miarę rozwoju internetu, jego prędkości, a także coraz lepszego wyposażenia centrów zarówno w oprogramowanie jak i oprzyrządowanie (np. szybkie pamięci masowe do przechowywania danych).

Na początku podrozdziału 2.2.4. „Modele sprężyste z degradacją” Autor podaje wzór na tensor naprężenia w sytuacji wystąpienia degradacji materiału sprężystego. Odwołanie się przez Autora wyłącznie do pracy [38] U. Haussler Combe z roku 2014 jest niewłaściwe ponieważ prekursorem mechaniki zniszczenia był L. Kachanov. Właściwym by było podanie również odwołania do monografii Kachanov, L. „Introduction to continuous damage mechanics”, Springer Verlag, 1986. Podobnie pisząc o uogólnieniu parametru degradacji na tensor degradacji nie wystarczy odwołać się do skądinąd bardzo dobrych prac Klisińskiego [54] (1984) oraz Pamina i Winnickiego [97] (2015), ale również do prac J.C. Simo i J.W. Ju „Strain- and stress-based continuum damage models – I. Formulation”, Int. Journal of Solids and Structures, Vol. 23, 7, pp. 821-840, 1987.

Na zakończenie Autor podaje kierunki dalszych prac. Autor proponuje implementację w systemie OA Calculix. Moją sugestią by było raczej przyjrzenie się systemowi, który jest również OA, a mianowicie Warp3d (University of Illinois, USA). System ten również jest częściowo kompatybilny ze środowiskiem Abaqus. Na przykład istnieje miejsce na procedurę UMAT. Bardzo istotną zaletą tego systemu jest jego zrównoleglenie przy zastosowaniu MPI. Użytkownik jednak implementując procedurę nie musi właściwie specjalnie martwić się o równoległość ponieważ procedury MPI są implementowane ponad procedurami modeli konstytutywnych.

Jak najbardziej ciekawym kierunkiem dalszych badań są metody oceny niezawodności konstrukcji żelbetowych. Jednak wymaga on wcześniejszych prac na analizą wrażliwości tych konstrukcji.

Błędy redakcyjne (nieliczne, a właściwie dwa):

Str. 25 nad wzorem 2.3 – jest „oznacznymi”, a powinno być „oznaczonymi”,

Str. 103 po odwołaniu do pracy [73] – jest „nieliniowm”, a powinno być „nieliniowym”.



#### **4. Ocena osiągnięć zawartych w rozprawie**

Autor postawił sobie trudne zadanie rozwinięcia nowego modelu konstytutywnego dla złożonego materiału jakim jest żelbet dokonując jego opisu teoretycznego, implementacji komputerowej, a także weryfikacji na przykładach. Z zadania tego wywiązał się bardzo dobrze udowodniając również obie postawione tezy, a zatem cel rozprawy należy uznać za zrealizowany.

Rozprawa jest pracą w wysokim stopniu oryginalną o dużym wkładzie intelektualnym Autora. Problem został rozwiązany całkowicie poprawnie, o czym świadczą uzyskane wyniki i stanowi istotny wkład w rozwój dziedziny budownictwa.

Duże znaczenie ma wykonanie porównań z wynikami obliczeń wykonanych przy użyciu modelu CDP, który jest modelem dostarczanym przez Autorów systemu Abaqus tym samym podejmując z nimi dyskusję. Autor wskazuje na poprawność swoich wyników, z czym recenzent się zgadza. Pewną luką w przypadku przykładu zbiornika obrotowo-symetrycznego jest brak porównania wyników z modelem CDP. Jednak dokonane zostało porównanie wyników z innymi modelami konstytutywnymi określonymi przez Autora jako A i B co pozwala na stwierdzenie poprawności otrzymanych wyników przy zastosowaniu opracowanego modelu konstytutywnego.

#### **5. Wniosek końcowy**

Zamieszczone powyżej uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź dotyczą terminologii lub edycji tekstu.

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego i wskazuje na wysoki poziom wiedzy teoretycznej Kandydata z dyscypliny budownictwo, a także na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata.

Opiniowana praca spełnia wymagania w stopniu całkowicie wystarczającym wymagania artykułu 13, ustęp 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i może być dopuszczona do publicznej obrony.

