

Prof. dr hab. inż. Michał Knauff



**Recenzja pracy doktorskiej  
wykonanej w Instytucie Techniki Budowlanej**

**NIELINIOWA ANALIZA ŻELBETOWYCH  
KONSTRUKCJI POWŁOKOWYCH METODĄ  
ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH UWZGLĘDNIAJĄCA  
USZTYWNIENIE ZBROJENIA PRZY ROZCIĄGANIU**

**Autor rozprawy: mgr inż. Sławomir Dudziak**

**Promotor: dr hab. inż. Paweł Lewiński, prof. ITB**

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Artur Piekarczyk, prof. ITB

Warszawa, luty 2020

## 1. Uwagi wstępne

Recenzję opracowano na podstawie listu z prośbą o opracowanie recenzji (z załącznikami) wystosowanego dnia 12 grudnia 2019 roku przez przewodniczącego Rady Naukowej ITB, prof. dr. hab. inż. Andrzeja Garbacza.

Rozprawa doktorska „Nieliniowa analiza żelbetowych konstrukcji powłokowych metodą elementów skończonych uwzględniająca usztywnienie zbrojenia przy rozciąganiu” opracowana przez mgr. inż. Sławomira Dudziaka pod kierownictwem dr. hab. inż. ITB Pawła Lewińskiego, profesora ITB (promotor pomocniczy: dr hab. inż. Artur Piekarczyk, prof. ITB) liczy 130 stron (+8 stron załączników) i składa się z pięciu rozdziałów oraz trzech załączników. Spis piśmiennictwa liczy 136 pozycji. W pracy umieszczono streszczenia po polsku i po angielsku. Rozprawa zawiera obszerną listę użytych w niej symboli.

## 2. Tematyka i cel rozprawy

Cel, treść i zakres rozprawy Doktorant przedstawia w p. 1.3. Jak pisze Doktorant, celem jest opracowanie modeli konstytutywnych „o racjonalnej złożoności, dobrze odwzorowujących pracę żelbetu w trójosiowym stanie naprężenia” oraz zastosowanie tych modeli w nieliniowej analizie powłokowych konstrukcji żelbetowych”.

„W rozprawie podjęta zostanie próba udowodnienia dwóch głównych tez” pisze Doktorant. Pierwsza teza to stwierdzenie, że w analizie dużych ustrojów konstrukcyjnych z wykorzystaniem komputerów klasy PC racjonalne jest stosowanie nieliniowej teorii sprężystości oraz koncepcji rysy rozmazanej. Druga teza dotyczy uwzględniania współpracy betonu i zbrojenia („tension stiffening”). Doktorant twierdzi, że zjawisko to można uwzględnić modelując beton jako materiał kruchy i modyfikując relację konstytutywną stali zbrojeniowej.

Pierwsza teza nie jest bardzo oryginalna, ale w pracy znajdujemy wartościowy, krytyczny przegląd stanu wiedzy dotyczącej tego zagadnienia oraz opracowany i zweryfikowany przez Doktoranta algorytm oparty na wymienionej w tezie zasadzie. Za wartościową uważam drugą tezę, przede wszystkim z tego powodu, że takie modelowanie współpracy zbrojenia i betonu jest od lat przyjęte w europejskich normach projektowania konstrukcji żelbetowych, a słabiej uwzględniane w opracowaniach dotyczących zastosowań MES do tych konstrukcji. Tę moją opinię rozwijam w p. 3 recenzji.

Temat rozprawy jest aktualny i ważny. Poza znaczeniem poznawczym rozprawa ma także znaczenie praktyczne, gdyż opracowane w niej algorytmy można zastosować w opartych na MES, powszechnie dostępnych systemach obliczeń.



### 3. Charakterystyka rozprawy oraz uwagi dotyczące poszczególnych rozdziałów

W rozdziale 1 zatytułowanym „Wprowadzenie” doktorant w p.1.3 bardzo zwięźle charakteryzuje metody obliczania konstrukcji żelbetowych i uzasadnia stosowanie zaawansowanych modeli do konstrukcji, w których istotne znaczenia ma złożony stan naprężenia. Doktorant słusznie stwierdza, że metody analizy nieliniowej nie uzyskały w praktyce takiej popularności jak liniowa analiza MES i pisze, że „...w dalszej części pracy podjęta zostanie próba wyjaśnienia tej sytuacji.”

Ogólny, bardzo krótki (2 strony) przegląd aktualnego stanu wiedzy przedstawiony w p.1.2. świadczy o szerokiej wiedzy Doktoranta i umiejętności zwięzłego przedstawienia bardzo obszernego i złożonego zagadnienia.

W rozdziale 2 „Przegląd modeli konstytutywnych stosowanych w analizie konstrukcji żelbetowych” doktorant przedstawia dobrze uporządkowany przegląd powierzchni (w układzie współrzędnych przedstawiających naprężenia główne) określających graniczne naprężenia w betonie, a następnie zajmuje się zależnościami stosowanymi do opisu odkształcalności betonu w złożonym stanie naprężenia. W punkcie 2.2 Doktorant przedstawia modele konstytutywne betonu najczęściej stosowane w systemach MES. „Cechą wspólna wszystkich modeli jest traktowanie zarysowania w sposób rozmazany” pisze Doktorant. Moim zdaniem, w związku z tym stosując takie modele można oczekiwać racjonalnych wyników dotyczących nośności granicznej, uśrednionych naprężeń w betonie, w zbrojeniu i przemieszczeń. Jednakże wyniki te nie wystarczają do sprawdzenia, czy konstrukcja spełnia wszystkie wymagania, które stawia się w normach. Od kilkudziesięciu lat europejskie normy projektowania wymagają, żeby szerokość rys nie przekraczała szerokości granicznej, zależnej od tzw. klasy ekspozycji na warunków panujących w środowisko. W związku z tym systemy MES oparte na założeniu rys rozmazanych powinny być uzupełnione o informacje, a może algorytmy, dotyczące wyznaczania szerokości rys. W rozprawie nie znajdują informacji na ten temat. Ponadto bardzo istotne znaczenie mają pęczanie i skurcz betonu. Ugięcia sprawdza się przede wszystkim dla obciążeń długotrwałych – wtedy bardzo istotny wpływ na wyniki ma pęczanie betonu.

To nie jest zarzut do Doktoranta. W tym rozdziale przedstawia on taki opis modeli stosowanych w MES, jaki dostarczyli autorzy tych systemów. Punkt widzenia autorów norm i podręczników żelbetu wynika z praktyki projektowania i znacznie różni się od punktu widzenia autorów systemów MES.

Słusznie, chociaż z może zbyt nieśmiało, Doktorant krytykuje metody uwzględniania zjawiska TS przez stosowanie krzywej opadającej w związku konstytutywnym betonu (np. na str. 37). Taki sposób byłby dobry, gdyby zbrojenie było rozmieszczane równomiernie w rozciąganych obszarach betonu, a przecież istotą konstrukcji żelbetowych jest koncentrowanie zbrojenia w obszarach, w których jest ono najbardziej skuteczne.

U dołu str.37 Doktorant pisze o modelach, w których stosuje się modyfikację związku konstytutywnego stali zbrojeniowej: „Wadą może być nieco wolniejsza zbieżność procedury

nieliniowej oraz problemy z oszacowaniem  $\rho_{p,eff}$  w przypadku nietypowych konstrukcji”. Tempo zbieżności jest jednak zagadnieniem drugorzędym w porównaniu ze zgodnością modelu z rzeczywistością. Problemy z oszacowaniem efektywnego stopnia zbrojenia występują nie tylko w przypadku modyfikacji związku konstytutywnego zbrojenia – są one immanentną cechą zagadnienia i zniknęłyby dopiero wtedy, gdyby uwzględniać każdy pręt zbrojeniowy osobno, rozpatrywać naprężenia przyczepności powstające w pobliżu każdej rysy i powstający tam poślizg zbrojenia względem betonu.

Z zainteresowaniem przeczytałem p. 2.4 „Uwagi o lokalizacji odkształceń”, w którym Doktorant przedstawia zależność siła-przemieszczenie w pręcie betonowym jako zależność charakterystyczną dla materiału kruchego.

Podstawowe znaczenie ma w rozprawie **rozdział 3** zatytułowany „**Opis proponowanego modelu konstytutywnego**”. W mojej recenzji zajmuję się przede wszystkim zagadnieniami specyficznymi dla konstrukcji żelbetowych, a więc sposobem modelowania współpracy zbrojenia z betonem i wpływu tej współpracy na zarysowanie. Jak pisze Doktorant, do modelowania prętów zbrojeniowych wykorzystano „elementy kratowe” T3D2 z systemu Abaqus, przedstawione na rys. 3.18 rozprawy. Te elementy zostały „osadzone” w betonie. Domyślam się, że przemieszczenia węzłów elementu i pokrywających się z nimi węzłów elementów reprezentujących beton są równe. Zależność konstytutywną „elementu zbrojeniowego” Doktorant opisuje na str. 57÷60 rozprawy. Zależność ta opiera się na zasadach sformułowanych w pracy [38], która z kolei jest oparta na zasadach *fib* Model Code for Concrete Structures [33]. Bardzo podobne zasady znajdują się w aktualnej europejskiej normie projektowania, będącej jak wiadomo również normą polską PN-EN. Szkoda, że nie została ona umieszczona w bibliografii. Podstawowy wzór, dotyczący zależności w fazie ustabilizowanego zarysowania, jest w tych opracowaniach taki sam (pomijając drobne różnice oznaczeń – np. współczynnik oznaczony w rozprawie przez  $\beta_i$  w normie ma oznaczenie  $k_i$ ). Jednakże kompletna zależność (3.41) w rozprawie nie jest pozbawiona niejasności. Tak więc, nie wiadomo jaką wartość należy nadać współczynnikowi  $\alpha$  (w tabelicy 3.2 znajdujemy zalecenie  $\alpha = 1,0 \div 1,2$  nie poparte żadnym uzasadnieniem) i jak określić  $\rho_{p,eff}$ . Na podstawie przykładu belki w rozdziale 4, służącego do weryfikacji metody, domyślam się (nie wiem, czy słusznie), że należy przyjmować zasięg strefy rozciąganej równy  $2,5a$  (jak w PN-EN i [33]), ale przecież w tych opracowaniach występują również inne warunki, związane z wysokością strefy rozciąganej. Z ostatniego wiersza zależności (3.41) wynika, że naprężenia w zbrojeniu mogą przyjmować wartości większe od  $f_y$ , co nie jest przecież możliwe.

Nie wspomina się o innych możliwościach uwzględniania zjawiska TS. Tak np. w normie europejskiej PN-EN umieszczono dwie zasady – ta, o której tu mowa występuje w rozdziale dotyczącym zarysowania, a inna zasada znajduje się w rozdziale dotyczącym ugięć. Warto by także



wspomnieć, że w starszych normach (z lat 1976 i 1984) zjawisko TS było uwzględniane przez zastosowanie współczynnika o nazwie  $\psi_{ts}$ , chociaż nie stosowano nazwy „tension stiffening”.

Wynikiem obliczeń są naprężenia i odkształcenia, na podstawie których można obliczyć ugięcia. Nie wspomina się w ogóle o rozstawie i szerokości rys. Jeżeli chodzi o rozstaw rys, to MES oferuje duże możliwości również wtedy, gdy stosuje się zarysowanie rozmyte. Prosiłoby się, żeby sprawdzić, jak wyniki uzyskane przez Doktoranta mają się do obliczonych według normy.

Według aktualnych (a także starszych) norm projektowania należy sprawdzić czy szerokość rys i ugięcia **wywołane przez obciążenia długotrwałe** nie przekraczają wartości granicznych. W związku z tym należy zauważyć, że czasem zdarza się, że obciążenie długotrwałe jest mniejsze od rysującego, ale element jest zarysowany przez większe od długotrwałego obciążenie całkowite. W takim przypadku należały sztywność elementu i szerokość rys obliczać jak dla elementu zarysowanego, pomimo że obciążenie jest od rysującego mniejsze. Szerokość rys w takich przypadkach wcale nie musi być bardzo mała. Norma PN-EN umożliwia takie obliczenia – inaczej niż w normach starszych wzory dotyczące elementu zarysowanego nie tracą sensu fizycznego w przypadkach, w których siła jest mniejsza od siły rysującej. Zagadnienie to omówiono np. w zacytowanej w rozprawie mojej książce [55]. W rozprawie doktorskiej wzięto go pod uwagę – w pierwszym wierszu wzoru (3.41) zakłada się, że element nie jest zarysowany.

W rozprawie nie omawia się sposobów, które można by zastosować w celu uwzględnienia skurczu betonu, który ma przecież bardzo istotny wpływ na zarysowanie konstrukcji żelbetowych.

**Rozdział 4 to „Weryfikacja opracowanego algorytmu”.** W p. 4.1 omówiono działanie algorytmu w podstawowych przypadkach obciążenia osiowego. Godna uwagi jest analiza elementu poddanego obciążeniu i odciążeniu przedstawiona w p. 4.1.1. P. 4.2 dotyczy belki żelbetowej, p. 4.3 tarczy, p. 4.4 płyty, a p. 4.5 zbiornika cylindrycznego posadowionego na odkształcalnym podłożu. Pomimo takiego bogactwa przykładów nie czuję się w pełni przekonany o wiarygodności reprezentowaniu zjawisk specyficznych dla żelbetu.

W szczególności mam zastrzeżenia do weryfikacji algorytmu przez porównanie wyników z wynikami badań eksperymentalnych. Zwykle w pracach eksperymentalnych za wiarygodne uważa się tylko takie wyniki, które otrzymano jako średnie z badań kilku elementów, a informacje o rozrzucie wyników uznaje się za niezbędne. Wiadomo przecież, że dyspersja wyników badań elementów z betonu jest znaczna. Przykład belki jest mało trafny. Przede wszystkim belka (rys. 4.16) jest niezwykle mała jak na element żelbetowy – ma około 90 cm rozpiętości, wysokość 10,2 cm i jest zbrojona dwoma prętami  $\Phi 6$  mm. Ponadto nie wiadomo, czy zbrojenie było żebrowane, czy gładkie. Bardziej wiarygodną ocenę algorytmu otrzymałoby się porównując wyniki z obliczeniami wykonanymi według normy (w przypadku zginania norma jest oparta na dobrze ugruntowanej teorii). Wtedy można by rozpatrzyć realne przykłady i porównując rozstawy i szerokości rys wyznaczone



według normy i dostarczone przez MES, sprawdzić, czy algorytm jest odpowiedni przy różnych stopniach zbrojenia i różnych grubościach otulenia.

**Rozdział 5** zatytułowany „**Podsumowanie**” zawiera wnioski i postulaty dotyczące kierunku dalszych prac. W pierwszym akapicie Doktorant pisze „Należy dążyć do upowszechnienia zaawansowanych metod nieliniowej analizy nietypowych, istotnych dla bezpieczeństwa publicznego konstrukcji żelbetowych...”. To jest frazes, a nie wniosek wynikający z rozprawy doktorskiej. Takie frazesy – jeżeli uzna się je za potrzebne - można umieszczać we wstępie, ale nie we wnioskach.

Dalej Doktorant stwierdza, że w rozprawie dokonano przeglądu fenomenologicznych związków konstytutywnych stosowanych w analizie konstrukcji żelbetowych, a szczególnie w zaawansowanych systemach MES jak np. ANSYS, DIANA, ATENA i ADINA. Przegląd ten uważam za bardzo pożyteczny. Doktorant uważa, że w większości systemów „zaimplementowano bardzo złożone sprężysto-plastyczne lub sprężysto-plastyczno-kruche modele konstytutywne, które cechuje znaczny koszt numeryczny”. Takie modele są odpowiednie do analizy stanów, w których naprężenia ściskające są bliskie granicznym, a takie stany rzadko występują w konstrukcjach żelbetowych – na ogół przyczyną osiągnięcia nośności granicznej jest uplastycznienie zbrojenia. Zwykle wystarczą analizy oparte na prostszych modelach. Tu podzielam zdanie Doktoranta.

Streszczając rozdziały 3 i 4 rozprawy Doktorant opisuje dwa podstawowe sposoby uwzględniania zjawiska TS. Podzielam opinię Doktoranta, że sposób polegający na stosowaniu „uogólnionego związku konstytutywnego stali” (taką nazwę stosuje doktorant), lepiej odpowiada istocie zagadnienia i metodom przyjmowanym dziś w normach projektowania. Mam jednak zastrzeżenia do opisu zastosowanego w rozprawie. W proponowanym modelu „w fazie ustabilizowanego zarysowania następuje zwiększenie naprężeń w stali zbrojeniowej” pisze Doktorant. O jakie zwiększenie tu chodzi? Zwiększenie w porównaniu z czym? Lepiej byłoby ująć rzecz tak. Model MES składa się elementów skończonych reprezentujących beton i ze skończonych elementów liniowych reprezentujących zbrojenie z otaczającą je warstwą betonu (nie do końca rozwiązany problem  $A_{c,eff}$ ). Nazwijmy je „elementami zbrojeniowymi”. Sztywność elementów zbrojeniowych jest oczywiście większa niż sztywność samego pręta stalowego („tension stiffening”), gdyż odkształcenia zbrojenia są ograniczane przez współpracujący z nim rozciągany beton. Podstawowe cechy modelu opracowanego przez Doktoranta są poprawne i godne uwagi, ale szczegóły związane z takim modelowaniem budzą wiele zastrzeżeń, które przedstawiłem omawiając rozdział 3 rozprawy.

W poprzednim punkcie recenzji przedstawiłem już moją opinie o testach przeprowadzonych przez Doktoranta.

Zgadzam się z zakończeniem wniosków (p.5.1) Doktoranta, gdzie stwierdza się, że opis zjawiska TS zastosowany w rozprawie jest celowy zarówno ze względu na zgodność opisu z rzeczywistym przebiegiem zjawisk jak i ze względu na cechy korzystne z numerycznego punktu widzenia.

Kończąc podsumowanie Doktorant stwierdza, że dwie tezy sformułowane na początku rozprawy zostały udowodnione. Uważam, że Doktorant niepotrzebnie rozpatruje rozprawę według sztywnego schematu „teza – dowód”. Wiele wartościowych prac nie ma takiej struktury, a rozpatrywana tu praca tylko z trudem daje się do niej nagiąć. Jeżeli Doktorant chciałby udowodnić, że jego rozprawa spełnia wymagania ustawy (ale to powinni ocenić recenzenci), to powinien wykazać, że spełnione są zacytowane poniżej wymagania (cytuję art. 13.1 „Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym...”) *„Rozprawa doktorska, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego ...oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej... oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej...”*.

Kierunki dalszych prac Doktorant nakreślił w p. 5.2. Do tych prac konieczne należy dodać udoskonalenie modelu TS i sprawdzenie lub wykalibrowanie go przez porównanie z wynikami obliczonymi według normy.

#### **4. Ogólna ocena jakości rozprawy doktorskiej i przedstawionych w niej osiągnięć**

Zagadnienie, będące przedmiotem rozprawy doktorskiej jest jasno określone na początku opracowania. Rozprawa jest oparta na obszernym i właściwie dobranym piśmiennictwie, które zostało wnikliwie przeanalizowane. Należy docenić sposób prezentowania stanu wiedzy. Doktorant omawia trudne zagadnienia systematycznie i w sposób uporządkowany, a nie – jak to się często zdarza w rozprawach doktorskich – cytując bezładnie i bezkrytycznie liczne prace np. w kolejności chronologicznej.

Jak już wspomniano, spis piśmiennictwa liczy 136 pozycji. W rozprawie poruszono wiele zagadnień należących do mechaniki konstrukcji, komputerowych metod analizy konstrukcji i teorii konstrukcji żelbetowych. W związku z tym spis piśmiennictwa nie może być wyczerpujący – w miarę kompletna bibliografia tych zagadnień musiałaby liczyć tysiące pozycji. Pomimo, że zamieszczone w pracy piśmiennictwo dotyczące teorii żelbetu jest raczej ubogie (to samo mogliby zapewne powiedzieć o swoich dziedzinach teoretycy konstrukcji i informatycy) uważam, że w pracy, która łączy kilka dziedzin, trzeba je uznać za wystarczające,

Na tle innych prac doktorskich i habilitacyjnych, które recenzowałem w ostatnich latach, rozprawa wyróżnia się poprawnością języka i precyzją wypowiedzi. Tu muszę jednak dodać, że zwykle w publikacjach dotyczących konstrukcji z betonu polszczyzna budzi bardzo wiele zastrzeżeń, a więc moja pozytywna ocena jest trochę oparta na zasadzie „wśród niewidomych jednooki królem”. Jawnych błędów stylu i języka jest w rozprawie mało, ale można w niej znaleźć niejasności, a zwłaszcza pretensjonalne i zawile sformułowania (przykłady poniżej).



Strona	Jest	Moje uwagi
21	Proces rozwoju zarysowania <u>determinuje</u> odpowiedź materiału zarówno w zakresie naprężeń ściskających jak i rozciągających	Czy nie prościej byłoby użyć zwrotu „wpływa na”?
24 u dołu	„...pod kątem możliwości zastosowania w analizie dużych konstrukcji żelbetowych...”	Dlaczego „dużych”? Domyślam się, że chodziło tu o to, iż stosując wyrafinowane metody analizy do prostych zagadnień, które można uważać za od dawna rozwiązane, narażamy się na zarzut niepotrzebnego komplikowania projektowania. Niemniej jednak uniwersalny algorytm MES nadaje się do konstrukcji dużych i małych.
27 i inne	Jako warunek powstawanie rys najczęściej <u>stosowana</u> jest kryterium Rankine’a	Należałoby raczej napisać: „przyjmuje się, że rysa pojawia się, gdy największe naprężenie główne staje się równe wytrzymałości betonu na rozciąganie”. Teraz od razu widać, że poprawność tego założenia nie jest niewątpliwa.
Przygotowując pracę do publikacji warto spróbować usunąć z niej wiele przymiotników. Zwykle teksty naukowe zyskują na takiej operacji.		

Uważam, że umiejętnie opracowany przegląd stanu wiedzy przedstawiony w rozprawie spełnia wymaganie dotyczące *ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w danej dyscyplinie naukowej*, a opracowane przez niego zasady i algorytmy można uznać za *oryginalne rozwiązanie problemu naukowego*.

Dodam jeszcze, że problemem naukowym, o którym tu mowa, jest stosowanie systemów MES do racjonalnej analizy konstrukcji żelbetowych. Uważam także, że pomimo niedociągnięć, które wytknąłem w rozprawie w p.3 recenzji, można rozprawę uznać za oryginalny wkład w rozwiązanie tego problemu.

## 5. Wniosek

Rozprawa mgr. inż. Sławomira Dudziaka spełnia w stopniu wystarczającym wymagania określone w art. 13.1 „Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym...”, tzn. stanowi oryginalne rozwiązanie



problemu naukowego, a doktorant wykazał, że ma ogólną wiedzę teoretyczną w szerokiej dziedzinie rozpatrywanej w rozprawie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sławomira Dudziaka i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Michał Knauff

