

Prof. dr hab. inż. Michał Knauff

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

**Recenzja pracy doktorskiej
wykonanej na Wydziale Budownictwa, Architektury
i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej**

**WZMACNIANIE KRÓTKICH WSPORNIKÓW
ŻELBETOWYCH ZBROJENIEM WKLEJANYM**

Autor rozprawy: mgr inż. Łukasz Krawczyk

Promotor: dr hab. inż. Tadeusz Urban, prof. PŁ

Warszawa, październik 2017

1. Uwagi wstępne

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej z dnia 13 lipca 2017 roku.

Rozprawa doktorska „Wzmacnianie krótkich wsporników żelbetowych zbrojeniem wklejanym” opracowana przez mgr. inż. Łukasza Krawczyka pod kierownictwem prof. Tadeusza Urbana liczy 196 stron i składa się z 5 rozdziałów oraz dodatku, który dotyczy analizy błędów powstających przy stosowaniu systemu Aramis. Ponadto w obszernym Załączniku (260 stron) przedstawiono szczegółowe opisy i wyniki badań. Załącznik jest bardzo wartościową częścią pracy, gdyż umożliwia innym badaczom ewentualne wykorzystanie wyników badań eksperymentalnych. Spis piśmiennictwa liczy 150 pozycji. Ponadto w pracy wykorzystuje się normy aprobaty i instrukcje (19 pozycji). W pracy umieszczono streszczenia po polsku i po angielsku. Rozprawa zawiera obszerną listę użytych w niej symboli.

2. Treść rozprawy doktorskiej i uwagi krytyczne związane z poszczególnymi rozdziałami

W **rozdziale 1** zatytułowanym „Wprowadzenie” zwięźle przedstawiono uzasadnienie podjęcia tematyki rozprawy, zakres i zawartość pracy oraz podstawowe tezy. Wzmacnianie krótkich wsporników żelbetowych zbrojeniem wklejanym nie było dotąd przedmiotem badań, ale wzmacnianie strefy przypodporowej stropów tym sposobem bywa stosowane. Badania doktoranta dotyczą wsporników o różnych smukłościach przy mniej więcej stałym stopniu zbrojenia. Wyniki badań analizowano stosując znane z piśmiennictwa metody obliczania wsporników z ewentualnymi modyfikacjami wynikającymi ze specyfiki rozpatrywanego zagadnienia.

W niektórych badaniach stosowano system cyfrowej analizy obraz Aramis. Wartościowym dodatkiem do rozprawy jest ostatni punkt, w którym analizuje się błędy powstające przy stosowaniu takiego systemu.

W p. 1.4 doktorant przedstawia **dwie tezy**.

- a) Wsporniki o niskim stopniu zbrojenia można skutecznie wzmacniać za pomocą prętów wklejanych.
- b) Metody stosowane do obliczania wsporników zbrojonych zwykłym sposobem można stosować do wsporników wzmacnianych pod obciążeniem przez wklejenie dodatkowego zbrojenia.

W **rozdziale 2** „Stan wiedzy” doktorant przedstawia przegląd badań eksperymentalnych i analitycznych dotyczących wzmacniania wsporników żelbetonowych. Nie ma, jak się zdaje, badań dotyczących metody wzmacniania (wklejanie prętów stalowych w uprzednio wywiercone otwory) takiej jak zastosowana w rozprawie doktorskiej – w związku z tym w p. 2.2 omawia się metody pokrewne, polegające na stosowaniu dodatkowego zbrojenia zewnętrznego lub przyklejanych do betonu taśm i mat z CFRP. P. 2.3 to przegląd metod obliczania nośności krótkich wsporników. Omówiono bardzo wartościową, klasyczną pracę Kriza i Rathsa, model opracowany przez Hagberga, metodę Nagrodzkiej-Godyckiej, normy polskie z lat 1999, 2002 i 2010, Model Code 2010 oraz przepisy amerykańskie ACI z 2014 roku, a także (w skrócie) starsze prace.

Punkt 2.4 dotyczy kotwienia prętów wklejanych. Badania dotyczące takiego kotwienia dotyczyły przede wszystkim wzmacniania narażonej na przebicie strefy przypodporowej w stropach, ale wyniki uzyskane w tych badaniach można wykorzystać w innych zastosowaniach wklejania.

W **p.2.5** doktorant podsumowuje stan wiedzy przedstawiony w całym rozdziale 2.

Rozdział 3 nosi tytuł „Badania własne”. W p. 3.1 szczegółowo opisuje się zbrojenie badanych elementów. P. 3.2 dotyczy badań właściwości zastosowanego betonu i stali. W p. 3.3 opisano stanowiska do badań oraz sposób wzmacniania przez wklejanie. Umieszczone w p.3.3.3 zbiorcze „zestawienie dotyczące przeprowadzonych badań” zawiera dane dotyczące obciążenia, odkształceń i zarysowania badanych elementów. W tytule tab. 3.4 występuje niejasny zwrot „szerokość zarysowania powierzchni podczas wzmacniania”. Chyba chodzi tu o szerokość rys na powierzchni, którą zaobserwowano pod obciążeniem, przy którym wklejono wzmacniające zbrojenie. Informacje te w tym miejscu wydają się być przedwczesne – powinny nastąpić w dalszych punktach, w których omawia się wyniki. Brakuje mi natomiast zwięzłego zestawienia rodzajów elementów i ich podstawowych cech w konfrontacji z celami badań poszczególnych serii – takie zestawienie powinno się znaleźć w tym miejscu lub wcześniej. Chcąc zorientować się w całości pracy, na podstawie obszernych opisów zawartych w p. 3.2, sporządziłem poniższe zestawienie.

Podstawowe cechy zbadanych elementów

	Wzmocnienie	Opis	Wymiary wspornika		Stopień zbroj.	Wzmoc %
			a_c	h_c		
A-0	niewzmocniony	wsporniki trapezowe, strzemiona poziome	150	300	0,40%	38%
A-I	pręt ukośny					
B-0	niewzmocniony	wsporniki prostokątne, strzemiona poziome	150	245	~0,50%	25%
B-I	pręt ukośny					
C-0	niewzmocniony	wsporniki prostokątne, strzemiona pionowe	150	250	~0,50%	59%
C-I	pręt poziomy					
C-II	pręt ukośny					
C-III	stołeczek stalowy					
D-0	niewzmocniony	bardzo krótkie, symetryczne wsporniki trapezowe	150	450	0,38%	16
D-I	mocno nachylone					
D-II	słabo nachylone					
D-III	mocno nachylone +okucie					
E-0	niewzmocniony	bardzo krótkie, symetryczne wsporniki prostokątne	125	450	0,38%	32
E-I	poziome długie					
E-II	poziome zredukowane					
E-III	poziome długie + stołeczek					

Te i inne, szczegółowe dane o elementach można oczywiście odczytać ze starannie wykonanych rysunków i opisów umieszczonych w rozprawie.

Z zestawienia wynika, że badania zaplanowano racjonalnie, z dużą starannością, na podstawie przejrzystej zasady, w taki sposób, żeby wyniki dotyczyły kilku podstawowych możliwości, które mogą wystąpić w praktyce.

Sposób wzmacniania opisano szczegółowo w p. 3.3.2, co pozwala na wyrobienie sobie poglądu na trudności związane z tym sposobem wzmacniania i na metody, które trzeba zastosować, żeby te trudności pokonać.

Wzmacnianie elementów wykonywano pod obciążeniem. Jest to godna uwagi cecha badań doktoranta, gdyż w badaniach laboratoryjnych najczęściej wzmacnia się elementy nieobciążone, a w rzeczywistości nie ma na ogół możliwości całkowitego odciążenia elementu, który ma zostać wzmocniony.

W p.3.4 i 3.5 znajduje się staranny i jasny opis pomiarów i obserwacji wykonywanych w czasie badań. Tu, a także w Dodatku A, omówiono problemy związane ze stosowaniem systemu Aramis do oceny szerokości rys.

P. 3.6 dotyczy nośności uzyskanej w badaniach i zawiera zestawienie wyników oraz opisy schematów zniszczenia. Porównanie nośności z nośnością elementów referencyjnych pozwala stwierdzić, że względnie mało skuteczne było wzmocnienie modelu B-I (wspornik prostokątny wzmocniony wklejonym ukośnym prętem), a bardzo znaczne wzmocnienie wystąpiło we wszystkich modelach serii C oraz w modelu D-III.

Rozdział 4 to „Analiza obliczeniowa”. Doktorant dzieli wsporniki na trzy rodzaje; wsporniki serii A, B i C bez CIII (zwykle wsporniki krótkie), wsporniki serii C i E (wsporniki bardzo krótkie) oraz wspornik C-III (ze stalowym stołeczkiem). W celu porównania wyników obliczeń z doświadczeniem doktorant przyjmuje, że w zbrojeniu głównym i prętach wklejonych osiąga się siłę odpowiadającą zerwaniu stali (nie podaje jednak, czy do strzemion zastosowano to samo założenie).

Stosując do zwykłych wsporników krótkich metodę Nagrodzkiej-Godyckiej doktorant przyjmuje, że na nośność wspornika wpływają wszystkie pręty rozciągane (zbrojenie główne, dodatkowe zbrojenie wklejone i strzemiona znajdujące się ponad strefą ściskaną). Takie obliczenie różni się od obliczenia według normy. W normie nośność wspornika oblicza się uwzględniając wyłącznie zbrojenie główne, a strzemiona konstruuje się na podstawie dodatkowych wymagań. Obliczenia dobrze aproksymują wyniki doświadczeń – stosunki obliczonych sił granicznych do sił wyznaczonych eksperymentalnie mieszczą się w granicach od 0,96 do 1,21 (wyjątkiem jest element C-0, dla którego przy założeniu, że w stali osiąga się granicę plastyczności, otrzymano wynik 1,49, ale przy założeniu, że osiąga się wytrzymałość stali wynik wynosi 1,01).

Porównanie wyników doświadczeń z obliczeniami metodą Hagberga (zmodyfikowaną przez doktoranta) daje prawie takie same wyniki. Według Hagberga niektóre wsporniki powinny zniszczyć się na skutek wyczerpania nośności betonu przy mniejszych od granicy plastyczności naprężeniach w zbrojeniu, a w doświadczeniach zaobserwowano zniszczenie ze względu na stal, co doktorant uwzględnił w swych obliczeniach.

Porównanie wyników doświadczeń z obliczeniami według norm wykazuje zapas bezpieczeństwa wynoszący od 34 do 50% (jak już wspomniano w normie [N6] budując podstawowy model ST nie bierze się pod uwagę strzemion). Tekst punktu 4.13, w którym omawia się obliczenia według normy, nie jest całkiem jasny. Doktorant pisze „zrezygnowano z obliczeń według normy [N6] z uwzględnieniem sugestii zawartych w [145]”, a w Tabelicy 4.5 podaje się wyniki obliczone według [N6].

W p.4.1.4 doktorant przedstawia propozycje ulepszonego modelu ST, w którym zachowując podstawowe zasady aktualnej normy, uwzględnia się wpływ sił w strzemionach (oprócz wzorów w rozprawie przedstawiono także graficzną ilustrację metody). Zastosowanie tego modelu prowadzi do wniosku, że wyczerpanie nośności rozpatrywanych tu elementów nastąpiło ze względu na stal. Wyniki obliczeń są bardzo zbliżone do uzyskanych metodą Nagrodzkiej- Godyckiej i metodą Hagberga.

W p. 4.2 analizuje się wsporniki bardzo krótkie, serii D i E. Zaproponowana przez doktoranta metoda obliczania nośności budzi wielkie zastrzeżenia. Istotny wpływ na wyniki obliczeń ma współczynnik β_{red} wyznaczany z wzorów Zhanga i Hsu. należałoby zatem omówić podstawy fizyczne tych wzorów. Tego w rozprawie nie ma. Ponadto wynikiem jednego z przedstawionych wzorów jest liczba niemianowana, a w drugim występuje $\sqrt{f_c}$ - wynik zależy od jednostek w których wyrażono f_c , a nie podano jakie to mają być jednostki (MPa? ksi?). Oba wzory zależą od głównych wydłużeń względnych (jak pisze doktorant „głównych odkształceń rozciągających”). W tabelicy 4.20 podano wartości tych wydłużeń wyznaczone systemem Aramis. Wynoszą one od około 1,6% do około 2,8%, a więc na pewno są to wydłużenia betonu poprzecznie zarysowanego (tzn. we wnętrzu bazy pomiarowej znajdowała się szeroka rysa) – nie mają one żadnego bezpośredniego sensu fizycznego. Otrzymane wartości można by ewentualnie zastosować do oceny szerokości rys. Na tej podstawie doktorant buduje wzór, który dobrze zgadza się z wynikami doświadczeń. Następnie, popełniając błąd typowy dla wielu prac eksperymentalnych (dopasowywanie teorii do wyników badań) wyciąga z tego wzoru zbyt daleko idące wnioski.

Wiarygodna metoda obliczania nośności powinna być oparta na jasnej analizie zjawisk fizycznych wpływających na nośność. Można by tu zastosować metodę ST w postaci bardziej rozwiniętej niż proste normowe przepisy dotyczące wsporników. Szkoda, że takiej analizy w rozprawie nie ma.

Dodatek A dotyczy analizy błędów powstających przy stosowaniu systemu Aramis. Doktorant wykazał się tu wnikliwością, ale zdaniem recenzenta, należałoby dobitniej

podkreślić, że system mierzy względne przemieszczenia wyróżnionych punktów powierzchni, a nie odkształcenia. W związku z tym powstają dwa zagadnienia:

- a) z jaką dokładnością (w mm) mierzy się zmiany odległości wyróżnionych punktów,
- b) jaka jest dokładność oszacowania odkształceń obliczonych na podstawie tych zmian odległości ?

Ad a. Dokładność pomiaru odległości nie jest zbyt wysoka – zdecydowanie mniejsza niż osiągnięta np. przez mechaniczne czujniki zegarowe o podziałce 10^{-3} mm. Powstaje zatem pytanie, czy można ją powiększyć?

Ad b. Zagadnienie b) jest klasycznym problemem techniki pomiarów – dokładność oceny odkształceń zależy od bazy pomiarowej i przy krótkich bazach (a w wielu przypadkach takie są potrzebne) też nie jest zbyt wysoka. Ponadto powstaje potrzeba wyznaczania odkształcenia wzdłuż wybranego kierunku (np. prostopadle do rysy) na podstawie pomiarów wykonanych na innych kierunkach. O tym nie ma mowy w rozprawie – potrzebne obliczenia zapewne wykonuje system komputerowy.

Zasadniczą zaletą Aramisa jest możliwość pokrycia siatką pomiarową pewnej powierzchni – w związku z tym system ten nadaje się on do analizowania zarysowania w przypadkach takich jak w rozprawie, kiedy to nie wiadomo dokładnie gdzie powstaną rysy. Niemniej jednak, nie mierzy on szerokości rys, a tylko przemieszczenia, na podstawie których, można tę szerokość oszacować.

Omówione tu aspekty są omówione również w rozprawie, ale nieco chaotycznie, na tle elementarnych podstaw teorii błędów, które można by z powodzeniem z pracy usunąć (np. wykres rozkładu normalnego na rys. A2), a wyjaśnić dokładniej specyfikę pomiarów Aramisem.

3. Ocena całości rozprawy i wniosków

Badania wykonano i opisano z wielką starannością.

Niestety języka rozprawy nie można polecać jako wzorowego. Tak np. w rozprawie na ogół stosuje się zwrot „nośność oblicza się”, ale na str. 159 w przedostatnim akapicie występuje błędny „sposób liczenia nośności wsporników”. We wnioskach na str. 160 występuje „nośność teoretyczna policzona” (powinno być „nośność obliczona”). W wielu miejscach pojawia się błędne stosowanie przyimka „dla” (np. na str. 71 występują „etapy wklejania dla wspornika”. Na początku p. 3.4 „Dla każdego badania dokonywano...” (nawiasem mówiąc, to zdanie jest w ogóle niepotrzebne). W wielu miejscach mamy także

„obliczenia według metody” zamiast „obliczeń metodą”, „obliczenia według modelu” zamiast „obliczenia na podstawie modelu”, szerokość rysy zmierzona „według systemu Aramis” zamiast „systemem Aramis”. W tytule tablicy 3.4 występuje „szerokość zarysowania powierzchni” zamiast „szerokość rys na powierzchni”. Występują także inne usterki stylu, które omawiam w innych miejscach recenzji.

Rozdział 5 zatytułowano „Wnioski końcowe”. W pierwszym akapicie mówi się o znaczeniu „nośności maksymalnej $F_{R,2}$ ”. Zgadzam się tu z opinią doktoranta, ale uważam, że należałoby jaśniej zdefiniować $F_{R,2}$, jako siłę graniczną, której nie da się powiększyć (lub da się powiększyć, ale w znikomym stopniu) przez zwiększanie zbrojenia (gdyż przyczyną zniszczenia jest wyczerpanie nośności betonu).

Na początku drugiego akapitu doktorant stwierdza, że „wszystkie zastosowane procedury obliczeniowe trafnie przewidywały nośność tych wsporników”. Jednakże pod koniec tego akapitu stwierdza się, że „Ze względu na brak zgodności między wynikami badań a nośnościami wsporników zaproponowano modyfikację metody Hagberga”. O co tu chodzi? Ostatnie zdanie zaprzecza pierwszemu i nie wiadomo, co w ostatnim zdaniu oznacza słowo nośność (nośność obliczoną?). To należy wyjaśnić. W trzecim akapicie należałoby pretensjonalny zwrot „mniej spektakularne efekty” zastąpić przez „mniejsze efekty”.

W zdaniu „Jednocześnie należy wskazać, że stosowane przez autora metody obliczania nośności...” chodzi oczywiście o metody opracowane przez inne osoby, a przeanalizowane przez doktoranta.

Zdanie „Na podstawie pracy Zhanga i Hsu [150] oraz wyników uzyskanych z systemu cyfrowej korelacji obrazu zaproponowano własny sposób liczenia nośności wsporników” należałoby z wniosków usunąć, gdyż nie można tego sposobu uznać za zadowalający.

Podstawowe wnioski, wyróżnione wcięciem tekstu na str. 160, są słuszne, wynikają z badań i analiz przedstawionych w rozprawie i mają praktyczne znaczenie.

Wzmocnienie przez wklejanie prętów okazało się skuteczne, a obliczenia oparte na powszechnie akceptowanych założeniach na ogół odpowiednie do oceny nośności elementów wzmocnionych tym sposobem.

W ostatnim akapicie mówi się o użyciu „nieliniowych programów MES uzależniających wytrzymałość betonu od stanu jego odkształcenia”, Zdanie to zdradza, że doktorant niezbyt dobrze orientuje się we współczesnych możliwościach i założeniach analizy numerycznej. Zapewne chodziło mu o to, że niektóre programy komputerowe mogą służyć do analizy wytężenia betonu w trójosiowym lub dwuosiowym stanie naprężenia. Do analizy

wsporników zapewne wystarczałyby model płaski – obszerny opis takich modeli można znaleźć np. w pracy J. Szarlińskiego, K. Winnickiego i K. Podlesia „Konstrukcje z betonu w płaskich stanach” wydanej w Krakowie w 2002 r. Nie jest to jednak jedyne zagadnienie, które należałoby uwzględnić budując model matematyczny wsporników. Jak się zdaje, podstawowe znaczenie miałyby sposób modelowania przyczepności zbrojenia (w programach MES najczęściej zakłada się całkowitą zgodność odkształceń zbrojenia i betonu, ewentualnie stosując teorię „rys rozmytych”).

4. Podsumowanie

Zagadnienie, będące przedmiotem rozprawy doktorskiej jest jasno określone w początkowej części rozprawy. Rozprawa jest oparta na obszernym i właściwie dobranym piśmiennictwie, które zostało wnikliwie przeanalizowane. Podstawą rozprawy są oryginalne, pracochłonne i trudne badania doświadczalne, które wykonano i opisano z dużym nakładem pracy i wielką starannością.

W rozprawie wykazano, że przez wklejanie dodatkowego zbrojenia można uzyskać istotne wzmocnienie krótkich wsporników żelbetowych, także wtedy, gdy wzmocnienie wykonuje się na obciążonym wsporniku.

Zaletami rozprawy są przede wszystkim :

- wartościowe, starannie zaplanowane, wykonane i opisane doświadczenia mające międzynarodowe znaczenie (w 2017 doktorant raz z promotorem opublikowali artykuł w *Structural Concrete*),
- bardzo staranne i przejrzyste rysunki ilustrujące zarówno doświadczenia jak i tezy teoretyczne.

Wartościowe elementy można znaleźć również w analizie zjawisk zachodzących w badanych modelach.

Wady rozprawy to niedoskonałości języka i niekiedy niejasne sformułowania w tekście, oraz naiwna interpretacja wyników badań wsporników bardzo krótkich w p.4.2 rozprawy.

Wady łatwo będzie wyeliminować w przyszłych publikacjach, a zalety tak zdecydowanie przeważają nad wadami, że stawiam wniosek o wyróżnienie pracy.

Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorant wykazał, że ma ogólną wiedzę teoretyczną w dziedzinie konstrukcji budowlanych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w tej dziedzinie.

Rozprawa spełnia zatem wymagania określone w art. 13.1 „Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym...”.

Stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Krawczyka i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Michał Knauff

Handwritten signature of Michał Knauff in black ink, written in a cursive style.