

Andrzej Ubysz, dr hab. inż., prof. ucz. (PWt).  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
Politechnika Wrocławska  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-3,70 Wrocław

Wrocław, dnia 28 lipca 2022 roku

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr inż. Igi Rewers  
pt. „Zarysowanie żelbetowych belek zginanych  
zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości SAS 670/800”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

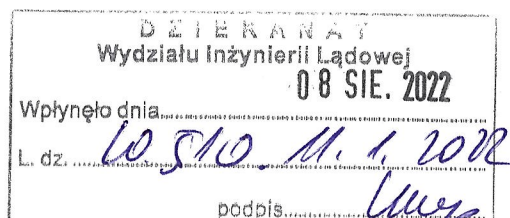
Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi uchwała Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 29 czerwca 2022 roku oraz Umowa o Dzieło zawarta pomiędzy Politechniką Krakowską im. Tadeusza Kościuszki z siedzibą przy ul. Warszawskiej 24, 31-155 Kraków, reprezentowaną przez prof. dr hab. inż. Andrzeja Szarotę – Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej działającym w tym zakresie na podstawie pełnomocnictwa Rektora Politechniki Krakowskiej, a autorem niniejszej recenzji – dr hab. inż. Andrzejem Ubyszem z Politechniki Wrocławskiej.

Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Andrzej Winnicki.

2. Przedmiot układ i zakres pracy

Praca dotyczy tematu w dziedzinie nauk technicznych: *budownictwo*, dyscyplinie naukowej: *inżynieria lądowa i transport* oraz specjalności: *konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone*. Najważniejszymi celami pracy, który postawiła sobie Autorka, było zbadanie szerokości rozwarcia rys w stanie granicznym użytkowości belek zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości SAS 670/800, wykonanych z betonu zwykłego i betonu o wysokiej wytrzymałości oraz zbadanie efektywności zbrojenia przypowierzchniowego w kontekście ograniczenia szerokości rozwarcia rys belek zbrojonych tą stalą. Przegląd dotychczasowego stanu wiedzy, usystematyzowane badania o szerokim spektrum i analizy numeryczne pozwoliły na sformułowanie pięciu wniosków merytorycznych oraz dwóch wniosków, o charakterze technicznym dotyczących metod badawczych i modelowania numerycznego.

Główna część pracy jest ponad 200 stronicowym opracowaniem uzupełnionym o blisko 100 stronicowy załącznik dokumentujący badania.



### 3. Charakterystyka pracy

Kolejne rozdziały pracy stanowią – można by powiedzieć – zwartą tematycznie monografię o tematyce zawartej w tytule dysertacji. **Tezy** pracy (**rozdział pierwszy**):

#### Teza 1

Szerokość rozwarcia rys w żelbetowych elementach zginanych, zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości SAS 670/800 przy poziomie obciążeń użytkowych nie różni się znacząco od szerokości rozwarcia rys elementów zbrojonych stalą zwykłą.

#### Teza 2

Zastosowanie zbrojenia przypowierzchniowego w żelbetowych elementach zginanych ogranicza szerokość rys zarówno na poziomie zbrojenia głównego belek, jak i powyżej niego.

stanowią dla Doktorantki kanwę do szeroko zakrojonych badań i analiz. W kolejnych rozdziałach przedstawiono następujące zagadnienia.

**W rozdziale drugim** nawiązano do badań Randla i Simona, w których przedstawiono charakterystyki stali SAS 670/800 oraz pokazano rezultaty z dotychczasowych eksperymentów wykonanych na belkach zbrojonych tą stalą i wykonanych z betonu bez dodatku włókien. Przedstawiono wyniki badań belek obciążonych statycznie (obciążenia krótkotrwale) oraz cyklicznie. Wyniki badań pokazują wartości ugięć i średnich szerokości rys, jednakże tylko dla jednego typu belki. W rozdziale tym pokazano również badania w zespole badawczym Scheibego, w którym cztery typy belek są zbrojonych stalą SAS 670/800 (trzy belki), a jedna jako, jako próba referencyjna zbrojona stalą B500.

**Rozdział trzeci** opisuje fenomenologiczny model rys prostopadłych. Pokazano w nim mechanizm powstawania rys oraz tak zwany tension stiffening, który można zdefiniować jako zjawisko prowadzące do wzrostu sztywności przekroju betonowego w wyniku przeniesienia naprężeń z pręta zbrojeniowego na beton pomiędzy dwoma sąsiednimi rysami. Rozdział ten zawiera również podstawy teoretyczne i wytyczne normowe obliczania szerokości rozwarcia rys. Rozdział stanowi zasadniczo preludium do zasadniczej części pracy, co usprawiedliwia, że nawiązano w nim tylko do praojców zarysowanych konstrukcji żelbetowych – Saligera, Muraszewa, Leonhardta, czy Watsteina oraz do najnowszych opracowań między innymi Lapi'ego (2018), Knauffa (2018), Flagi (2011), Balázsa (2005) i Froscha (2002).

**Rozdział czwarty** jest w pewnym sensie kontynuacją poprzedniego rozdziału, a zawiera opis najważniejszych badań i analiz dotyczących zbrojenia przypodporowego. W tym temacie

literatura jest znacznie uboższa i opiera się w dużej części na normach (EN, ACI i Model Code). Z prac autorskich przywołano tu publikacje Profesorów Furtak i Flaga (1992), Woliński (1993) i Sherwood (2008).

Autorska część pracy rozpoczyna się zasadniczo od **rozdziału piątego**. Zawiera on program oraz metodykę badań własnych. Wprowadzenie stanowi charakterystyka badanych materiałów oraz opis badanych elementów – próbek i belek. Zawiera również metodykę badań i opis stanowiska badawczego. Elementy poddawano krótkotrwałym obciążeniom według schematu 4P (czteropunktowe zginanie). W sześciu belkach zastosowano zbrojenie rozciągane ze stali SAS 670/800, a w pozostałych dwóch – ze stali B500SP. Dwie belki zbrojone stalą SAS 670/800 wykonano z betonu klasy C40/50, w pozostałych belkach zastosowano beton klasy C60/75. Pozwoliło to między innymi ocenić wpływ klasy betonu na zarysowanie badanych belek. Aby uniknąć wpływu, jaki rozstaw strzemion mógłby wywierać na rozstaw rys, w strefie stałego momentu umieszczono strzemiona krótkie, przytrzymujące jedynie pręty ściskane i sięgające do osi obojętnej. W pięciu badanych belkach oprócz zbrojenia górnego, dolnego i poprzecznego zastosowano zbrojenie przypowierzchniowe ze stali B500A. Zbrojenie to występowało w trzech wariantach, różniących się średnicą prętów.

W dalszej części pokazano między innymi zastosowane metody pomiarowe oraz etapy przykładania obciążenia. Zwraca tu uwagę rzetelność i stosowane metody wykonywania badań, podczas których prowadzono ciągłą rejestrację:

- siły wysuwu tłoka,
- przemieszczenia pionowe (za pomocą czujników LVDT),
- odkształcenia zbrojenia (przy użyciu tensometrów elektrooporowych).

Po osiągnięciu poszczególnych etapów przeprowadzano inwentaryzację rys oraz dokonywano pomiarów odkształceń za pomocą czujnika nasadowego typu DEMEC. Pomiar szerokości rys dokonywany był przy użyciu lupy Brinella. Na przeciwległej pionowej powierzchni belki, w celu zobrazowania pola przemieszczeń, wykonywano pomiary przy wykorzystaniu metody korelacji obrazów cyfrowych DIC.

W podsumowaniu tego rozdziału zestawiono i opisano przeprowadzone badania materiałowe oraz ich wyniki. Każdy typ zbrojenia stosowany w belkach był poddany próbie statycznego jednoosiowego rozciągania. Dla obu zastosowanych klas betonu określono:

- wytrzymałość betonu na ściskanie wraz z ciągłym pomiarem zależności naprężenie odkształcenie,
- wytrzymałość betonu na rozciąganie (próba osiowego rozciągania oraz próba brazylijska), sieczny moduł sprężystości betonu przy ściskaniu i skurcz betonu.

**Rozdział szósty** zawiera omówienie wyników badań przedstawionych w formach graficznych – wykresy, rysunki, mapy i fotografie. Przedstawiono w nim:

- wykresy pokazujące zależność odkształceń zbrojenia dolnego, górnego oraz przypowierzchniowego od obciążenia,
- wykresy ugięć zależne od czasu i obciążenia,
- wykresy odkształceń podłużnych belek pomierzone za pomocą czujnika DEMEC na wysokości zbrojenia dolnego,
- mapy odkształceń uzyskane metodą korelacji obrazów cyfrowych DIC,
- rysunki przedstawiające morfologię rys przy wybranych etapach obciążenia,
- fotografie belek (przed badaniem i po zniszczeniu).

Syntetyczne podsumowanie otrzymanych wyników badań w postaci tabel i wykresów oraz szczegółowa analiza uzyskanych wyników są przedmiotem **siódmego rozdziału**. Pokazano w nim wartości teoretycznych sił niszczących i momentów rysujących. Opisano i uzasadniono wartości naprężenia i stosunku naprężenia do granicy plastyczności, jakie przyjęto za odpowiadające stanowi granicznemu użyteczności dla belek zbrojonych różnymi gatunkami stali. Wyniki przedstawiono w formie tabelarycznej i na wykresach pomierzone na poszczególnych belkach – szerokości rys oraz ich rozstawy (średnie i kwantyle 95%). Wyniki te porównano z wynikami prognozowanymi zgodnie z EN 1992-1-1:2004, Model Code 2010 oraz ACI 318-95.

Analizę numeryczną przeprowadzoną w środowisku ABAQUS wykonano w **rozdziale ósmym**. Symulację komputerową wykonano na modelach belek zginanych o warunkach podparcia i obciążenia odpowiadających przeprowadzonym badaniom doświadczalnym. Opisano wykorzystane modele materiałowe, typy elementów skończonych oraz zastosowaną siatkę elementów skończonych. Działanie skurczu odwzorowano przez zadanie obciążenia ujemną temperaturą. Otrzymane wyniki porównano z wynikami badań doświadczalnych, posługując się wykresami przedstawiającymi zależności:

- ugięcia w środku rozpiętości belki,
- średniego odkształcenia zbrojenia dolnego i naprężenia tego zbrojenia w funkcji obciążenia.

Szerokość rys dla modeli numerycznych obliczano zgodnie ze wzorem opisanym w opracowaniu Szczecina, Winnicki. Uzyskane szerokości rys porównano z wartościami z badań doświadczalnych oraz z wynikami obliczeń otrzymanych z obliczeń normowych (EN 1992-1-1:2004). Analogicznie postąpiono z rozstawem rys – wartości średnie i kwantyle 95% uzyskane z modeli numerycznych porównano z rozstawem rys zmierzonym w trakcie badań doświadczalnych oraz z rozstawem obliczonym według EN 1992-1-1:2004. Porównano również morfologię rys uzyskaną z modeli numerycznych z morfologią rys badanych belek.

Pracę kończą pogrupowane tematycznie wnioski (**rozdział dziewiąty**) dotyczące:

- zastosowania zbrojenia wysokiej wytrzymałości jako zbrojenia głównego belek zginanych;
- wpływu zbrojenia przypowierzchniowego na stany graniczne nośności i użytkowania;
- spostrzeżeń przy obliczaniu szerokości rys;
- zależności szerokości rys od obciążenia;

Zamieszczono też własne spostrzeżenia związane z:

- przebiegiem badań doświadczalnych;
- numerycznym modelowaniem zginanych belek;
- a w szczególności z zastosowaniem metody korelacji obrazów cyfrowych.

#### 4. Ocena pracy

Praca zwraca uwagę zarówno ze względu na zakres jak i ze względu na staranność wykonanych i opracowanych badań. Dotyczy to zarówno badań doświadczalnych, jak i numerycznych. Dysertacja sformułowana jest w sposób pozwalający zakwalifikować ją jako pracę o charakterze naukowym.

**Tezy pracy (rozdział 1)** wskazują cel przeprowadzanych badań i stanowią jasno sformułowane zadanie, które wzorowo zostało zrealizowane w niniejszej dysertacji.

Celem pracy jest sformułowanie zadania badawczego, w tym przypadku w formie sformułowanych tez i doświadczalne lub analityczne wykazanie ich słuszności. Zdaniem recenzenta zawarte w pracy wyniki badań doświadczalnych i numerycznych dają satysfakcjonującą odpowiedź na postawione na wstępie cele zadania. Cele pracy są jasno sformułowane:

- wprowadzenie przedstawiające istniejący stan wiedzy;
- część badawcza zawierająca przejrzystą sekwencję badań laboratoryjnych;
- analiza numeryczna oparta na powszechnie uznanych teoriach i modelach obliczeniowych oraz na dyskusji otrzymanych wyników;
- wnioski podsumowujące kolejne etapy pracy, sformułowane w taki sposób, aby widoczne były również realne problemy i dalsze zamierzenia badawcze.

Jeżeli chodzi o zakres pracy, to w niniejszej rozprawie Autorka:

- zebrała wyniki badań doświadczalnych prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych w kraju i zagranicą, zarówno pod kątem bezpośredniego zakresu tematycznego pracy, jak i w szerszym kontekście mechaniki betonu;

- wykonała własne badania na relatywnie wysokim poziomie naukowym i technicznym z zastosowaniem nowoczesnych metod pomiarowych;
- dokonała dyskursu naukowego zestawiając wyniki badań i aktualnych zaleceń normowych,
- przedstawiła wnioski wynikające z własnych badań oraz propozycje numerycznych modeli do symulacji współpracy betonu ze zbrojeniem dla wysokich klas betonu i prętów zbrojeniowych, w szczególności w obszarze naruszenia współpracy obu tych materiałów konstrukcyjnych.

Badania, które pokazano w **rozdziale 2**, dotyczące elementów zginanych zbrojonych stalą SAS 670/800 ograniczyły się do obciążeń krótkotrwałych oraz pokazania morfologii rys w stanach granicznych użytkowalności. Rozdział ten charakteryzuje aktualny stan wiedzy w tym temacie i Doktorantka zwróciła uwagę na skromną ilość badań w tym zakresie. Należy zwrócić uwagę, że badania o których mowa realizowane były w latach 2012 – 2014, a więc niespełna 10 lat temu, co świadczy o aktualności i w pewnym sensie nowatorstwie podjętej tematyki.

Uwaga do tego rozdziału dotyczy rysunku 2.7, który jest trudny do analizy ze względu na małą rozdzielczość.

Ogólne przedstawienie zagadnienia współpracy betonu i zbrojenia oraz mechanizmu rozwarcia rys prostopadłych w **rozdziale 3** zostały opracowane z dużą starannością i na wysokim poziomie. Pewien niedosyt budzi jednak nieobecność takich nazwisk, jak Profesorowie Rüsche, Elighausen oraz bogatszego rozbudowania wątku narodowego – Profesorowie Bukowski, Ryżyński, Kuczyński, Godycki-Ćwirko i Borecz. Pokazanie tradycji nauki polskiej jest zawsze inspiracją do aktywnej pracy badawczej kolejnych pokoleń. W związku z tym miałbym pytanie:

**Pytanie nr 1. W jaki sposób rysy wpływają na sztywność przekroju i sztywność na zginanie całej belki. Proszę podać przykłady teorii pokazujących zmiany sztywności zginanych elementów żelbetowych.**

Podobnie można ocenić **rozdział 4** podsumowujący stan badań i analiz dotyczących zbrojenia przypodporowego.

Centralnym punktem pracy są badania laboratoryjne zawarte w **rozdziale 5**. Tutaj jeszcze raz chciałbym zaakcentować wysoki poziom przeprowadzonych badań i sposób ich prezentacji. Opis w pracy i załączniki stanowią wartościowy materiał zarówno przy dalszych badaniach w tym temacie, jak i w analizach zagadnień zbliżonych. Szczegółowe pomiary i sposób ich notacji przypominają redakcję niemieckich zeszytów naukowych Deutsche Ausschuss für Stahlbeton

e.V. (DAfStb), które to zeszyty są cennym materiałem źródłowym do analiz naukowych nawet po kilkudziesięciu latach.

Uwagi i pytania do rozdziału 5.

- Rys. 5.24, oś X powinna być opisana dwoma cyframi znaczącymi po przecinku (aktualny opis to 0,2; 0,2; 0,3; 0,3; 0,4; 0,4 ; zamiast 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45)
- Co oznaczają liczby w tabeli 5.9 – liczbę próbek ?

Z rozdziałem tym związane jest pytanie nr 2.

**Pytanie nr 2. W jaki sposób realizowano osiowość przy próbie rozciągania i w jaki sposób określano odchyłki od idealnego osiowego rozciągania. Proszę podać przykłady innych metod pozwalających doświadczalnie wyznaczyć wartość wytrzymałości betonu na rozciąganie.**

Prezentacja wyników własnych badań w rozdziałach 6, 7 i 8 jest usystematyzowana i bardzo przejrzysta. Stosunkowo skromna ilość badań wynika z obiektywnych trudności przy realizacji większości prac doktorskich. Jedną z nich jest określony limit czasu. Stąd badania mają dużą wartość jakościową, natomiast jeżeli chodzi o tak zwane *mocne wnioski*, które mogłyby być podstawą do wpisów normowych, wymagałyby jeszcze one rozszerzenia i weryfikacji. Z uznaniem należy się wypowiedzieć o staranności i rzetelności badań – niektóre z nich, jak na przykład skurcz, były realizowane przez blisko półtora roku. Również z uznaniem należy wypowiedzieć się o zastosowanych metodach badawczych, na przykład pomiary przy wykorzystaniu metody korelacji obrazów cyfrowych DIC, a w przypadku analiz numerycznych wykorzystanie oprogramowania ABAQUS, który to program nie należy do bardzo intuicyjnych. Zwraca również uwagę fakt, że we wnioskach końcowych Autorka rozpoczęła już symulację procesów zarysowania za pomocą programu ATENA (opracowany w firmie Červenka Consulting), który uważany jest jako jeden z najlepszych na świecie zaawansowanych programów do nieliniowych analiz konstrukcji.

W rozdziale 9 dwa pierwsze podrozdziały są odpowiedzią na postawione tezy, uzupełnione opisem wyników z doświadczenia i ich interpretacją. Wnioski te zostały rozszerzone o spostrzeżenia poczynione w trakcie badań laboratoryjnych i obliczeń. Jako jeden z ważniejszych wskazałbym na ten mówiący, że:

*„konieczne okazało się zastosowanie obciążenia ujemną temperaturą, co odwzorowywało oddziaływania skurczowe betonu. W modelach bez tego obciążenia, siła, przy której dochodziło do powstania pierwszej rysy była wyższa oraz sztywność belki w fazie zarysowanej była większa niż wynikałoby to z badań doświadczalnych”.*

Zwraca również uwagę stwierdzenie we wnioskach końcowych, że Autorka rozpoczęła już modelowanie numeryczne za pomocą programu ATENA, który powinien pozwolić na dokładniejszą symulację procesów zarysowania.

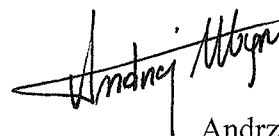
## 5. Uwagi końcowe

Dysertacje naukowe w naukach technicznych często zmierzają do udowodnienia tezy przez doświadczalne potwierdzenie oczekiwanych wyników. W opracowaniach naukowych często równie trudne jest precyzyjnie sformułowanie zagadnienia i opracowanie modelu, który mógłby zostać weryfikowany doświadczalnie. Uważam, że Doktorantce udało się bardzo dobrze wykonać oba te zadania. Doświadczenia innych Autorów oraz własne, na których oparto analizę a także sformułowanie własnego modelu obliczeniowego stanowią przekonującą podstawę zarówno dowodzącą tezy, jak i pozwalającą sformułować końcowe wnioski przedstawione w niniejszej pracy.

Podjęty przez Doktorantkę temat ma praktyczne zastosowanie w pracach projektowych i z pewnością należy do zagadnień kreujących dalsze kierunki dyscypliny naukowej. Autorka pokazuje zaznajomienie się z tematyką na poziomie studium literaturowego, w tym z publikacjami naukowymi i normatywami oraz co najważniejsze udowadnia, że potrafi samodzielnie przeprowadzać analizy badawcze i wyciągać konstruktywne wnioski. Problematyka, którą Autorka rozwija jako temat rozprawy doktorskiej, jest relatywnie nowa. Będzie zatem kolejnym wkładem polskich inżynierów do rozwijanych w świecie technologii badań modelowych.

Ranga tematu, sposób jego prezentacji w niniejszej rozprawie, która wskazuje na bardzo dobre przygotowanie Autorki do pracy naukowej, możliwość prezentowania tych wyników zarówno na konferencjach jak i w czasopismach naukowych, a także docelowe zastosowania praktyczne, uzasadnia wniosek o dopuszczenie Pani mgr inż. Igi Rewers do publicznej obrony oraz stosownie do zasad przyjętych przez Radę Wydziału ewentualne wyróżnienie pracy.

**Praca spełnia wymagania odnośnie prac doktorskich zawarte w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 roku, Nr 65 poz. 595, z późn. zm.) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Dz. U., z 2017 roku, poz. 1789).**



Andrzej Ubysz