

Prof. dr hab. inż. Anna Halicka

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Wojciecha Szymkucia

pt.

ANALYSIS OF BEHAVIOUR AND RESIDUAL CAPACITY OF FIRE CONCRETE-FILLED TUBULAR COLUMNS

przygotowanej pod kierunkiem dr hab. inż. Adama Glemy, profesora uczelni
i promotora pomocniczego dr inż. Michała Malendowskiego

Podstawa opracowania: uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej z dnia 19.12.2023 r., pismo przewodniczącego Rady Dyscypliny ILGiT prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy z dnia 20.12.2023 oraz umowa o dzieło między recenzentką i Politechniką Poznańską.

1. Problem naukowy, przedmiot, i charakter rozprawy

Konstrukcje zespolone są celowym połączeniem dwóch lub więcej elementów składowych w jeden element konstrukcyjny. Celem zespolenia jest osiągnięcie parametrów pracy statycznej lepszych niż parametry elementów składowych pracujących niezależnie. Dystrybucję sił wewnętrznych na elementy składowe zapewnia tzw. styk (złącze). Materiały elementów składowych są tak dobierane, aby maksymalizować wpływ ich właściwości pozytywnych na element zespolony, a minimalizować wpływ właściwości „gorszych”.

Zespolone elementy stalowo-betonowe, w tym słupy wykonane z rur stalowych wypełnionych betonem (CFST) są popularne w mostownictwie, stosowane są też coraz częściej w budownictwie ogólnym ze względu na rosnące wymagania znacznej smukłości (wymagania ze strony architektonicznej lub ze strony technologii produkcji realizowanej w projektowanym obiekcie). Wobec stosowania ich jako „odpowiedzialnych” elementów konstrukcyjnych, szczególnego znaczenia nabiera analiza w sytuacjach wyjątkowych, w tym pożaru. Zespolonym konstrukcjom stalowo-betonowym poświęcona jest norma europejska EN 1994 (Eurokod 4), a ich projektowaniu ze względu na warunki pożarowe – część 1-2 tej normy.

Podjęcie przez Doktoranta zagadnienia zachowania się słupów stalowo-betonowych w warunkach pożarowych uznaję za trafne ze względu na wiele wątpliwości dotyczących modeli stosowanych klasycznie w projektowaniu takich elementów w sytuacji pożaru. Za szczególnie ważną i ambitną uznaję próbę stworzenia zaawansowanego, opartego na interdyscyplinarnych podstawach, modelu numerycznego zachowania słupów CFST w warunkach pożaru i rozszerzenie analiz o zachowanie popożarowe. Doceniam też próbę zastosowania do wypełnienia rur stalowych kompozytu cementowego zawierającego lekki sztuczny wypełniacz – cenosferę popiołu lotnego. Ta próba wpisuje się we wspomniany wyżej cel tworzenia konstrukcji zespolonych – stosowania w nich konkretnych materiałów konstrukcyjnych w taki sposób, aby uzyskać poprawę właściwości użytkowych. W tym przypadku celem jest uzyskanie wyższej odporności pożarowej niż słupów zespolonych z betonem zwykłym.

Zważywszy powyższe, podjęty temat rozprawy doktorskiej uznaję za ambitny, aktualny i ważny z punktu widzenia zarówno poznawczego, jak i z punktu widzenia praktyki budowlanej.

Praca ma charakter analityczno-doświadczalny — jej istotą są zarówno analizy numeryczne jak i badania laboratoryjne. Cenne jest to, że Doktorant nie poprzestał na pracach kameralnych, ale wykonał też eksperymenty.

Mam jednak uwagę do tytułu rozprawy – moim zdaniem nie pokazuje on aspektu doboru materiału konstrukcyjnego do założonego celu (poprawy odporności pożarowej), a jest bardzo ogólna („analiza”).

2. Zawartość i układ rozprawy

Rozprawa napisana jest w języku angielskim. Liczy 215 stron tekstu podstawowego, do którego dołączono na początku spis treści, spis skrótów stosowanych w pracy oraz streszczenia w języku polskim i angielskim, a na końcu bibliografię. W mojej opinii w pracy brakuje spisu zastosowanych oznaczeń, co nieco utrudnia jej percepcję.

Obszerna bibliografia zawiera 494 pozycje literaturowe, w tym 39 norm i wytycznych. Cytowane prace są w większości angielskojęzyczne, choć jest tu także 18 prac niemieckojęzycznych, 11 polskojęzycznych i jedna francuskojęzyczna. Bibliografia zawiera 2 autorskie i 9 współautorskich publikacji Doktoranta.

W pracy wyróżnić można następujące części:

1. Wprowadzenie (rozdział 1) zestawiające informacje ogólne na temat słupów CFST i ogólnych zasad szacowania ich odporności pożarowej, a także prezentujące motywację podjęcia tematu i sformułowaną tezę badawczą,
2. Studia literaturowe (rozdziały 2, 3, 4, 5, 6) stanowiące bazę wiedzy na temat badań ogniowych i oddziaływań wywieranych na konstrukcje w warunkach pożarowych, właściwości betonu i stali w wysokich temperaturach, zrelacjonowano i przeanalizowano tu także eksperymenty i analizy teoretyczne słupów CFST,
3. Część analityczną:
 - opisującą budowę i walidację modelu numerycznego słupów CFST poddanych działaniu temperatur pożarowych wraz z analizą parametryczną (rozdział 7),
 - rozszerzającą wyniki uzyskane na modelu numerycznym na warunki popożarowe poprzez studium przypadku (rozdział 8),
4. Część badawczą, prezentującą badania kompozytu cementowego zawierającego cenosferę popiołu lotnego, ukierunkowaną na określenie jego parametrów istotnych z punktu widzenia odporności pożarowej (rozdział 9.1-9.3),
5. Kolejną część analityczną, w której dokonano porównania zachowania się modelu numerycznego przy zastosowaniu w nim parametrów betonu zwykłego i kompozytu z cenosferą,
6. Podsumowanie (rozdział 10).

3. Merytoryczna ocena pracy

3.1 Ocena ogólna rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska ma, jak już pisałam wyżej, charakter analityczno-doświadczalny. Stwierdzam, że jest ona pracą oryginalną. Realizacja rozprawy wskazuje na kompetencję Doktoranta, w szczególności w zakresie analiz numerycznych, ale także pracy w laboratorium. Widoczna jest konsekwencja działań, przemyślenie ich kierunku i twórcza realizacja. Pozwoliła ona na osiągnięcie celu rozprawy i udowodnienie postawionej tezy.

Szczegółowa ocena merytoryczna rozprawy zostanie przedstawiona poniżej poprzez oceny poszczególnych jej części. Zawarte tu uwagi, także dyskusyjne, mają na celu wskazanie zagadnień, na które należałoby zwrócić uwagę w dalszych badaniach i publikacjach.

3.2 Ocena wprowadzenia, motywacji, celu i tezy pracy

We wprowadzeniu zawarto wstępne informacje literaturowe na temat słupów CFST i ich nośności w warunkach pożaru, a także wskazano na dwa podejścia do projektowania elementów konstrukcyjnych z uwagi na warunki pożarowe (projektowanie proskryptywne i oparte na wynikach badań).

We wprowadzeniu znajdują się też ważne informacje dotyczące udziału Doktoranta w badaniach ogniowych słupów wypełnionych betonem w University of Hannover, o współpracy z naukowcami z University of Coimbra oraz o uczestnictwie w pracach RILEM dotyczących zachowania betonu w warunkach pożarowych, które to fakty zostały przez Doktoranta opisane jako „motywacja” podjęcia tematu (p. 1.4). Moim zdaniem winna tu być raczej podana motywacja merytoryczna (np. taka jak na str. 85²¹⁻¹⁸ studiów literaturowych: *W wyniku tych (omawianych przez Doktoranta w p.5.2) testów okazało się, że metoda obliczeń zawarta w Eurokodzie 1994-1-2 nie jest bezpieczna dla słupów smukłych. To odkrycie wzmocniło wysiłki w kierunku badania i rozwinięcia procedur obliczeniowych i wpłynęło na kierunek niniejszej rozprawy doktorskiej.*

We wprowadzeniu podano także cel pracy, którym jest identyfikacja czynników wpływających na zachowanie CFST w czasie i po ekspozycji na wysokie temperatury i w efekcie dobranie materiału wypełniającego, zwiększającego nośność pożarową słupów CFST w stosunku do słupów wypełnionych betonem zwykłym. Postawiono tezę: *Zachowanie się słupów CFST może być modelowane, a ich odporność ogniowa może być zwiększana przez dedykowany materiał wypełniający.* Zarówno do sformułowania celu, jak i tezy rozprawy nie mam większych uwag, choć teza jest nieco zbyt ogólna, zważywszy, że w pracy podjęto właściwie trzy problemy naukowe.

Moim zdaniem „wprowadzenie” powinno nieco jaśniej wprowadzać czytelnika w temat - wspomniane tu zagadnienia są ważne, ale dobrane wybiórczo, niektóre omówione zbyt szczegółowo jak na wprowadzenie i omawiane także później w studiach literaturowych. Po krótkiej historyczno-architektonicznej prezentacji słupów CFST zaprezentowano historyczne przykłady szacowania ich nośności w warunkach pożarowych i historyczne braki w wytycznych polskich. Moim zdaniem zabrakło ogólnych informacji wstępnych o projektowaniu i pracy statycznej takich elementów - chociażby stwierdzenia, że słupy CFST winny być projektowane z uwagi na sytuacje stałe i wyjątkowe, w tym pożarowe, a także pokazania na czym polega „zespolenie”, od czego zależy nośność analizowanych słupów w sytuacji stałej i co zmienia się w sytuacji pożarowej (krótka informacja o utracie zespolenia w warunkach pożaru i jej konsekwencjach znajduje się dopiero na str. 103). Zabrakło też wprowadzającego stwierdzenia, że ilekroć w pracy używane są określenia „zasady projektowania” i „podejście projektowe”, dotyczą one tylko zasad projektowania w warunkach pożaru.

Uwaga szczegółowa do wprowadzenia dotyczy informacji zawartych na str. 20⁵⁻¹. Napisano tu, że *Ingberg i inni* oszacowali odporność ogniową słupów CFST na 25 minut, a dla słupa zbrojonego odporność ta wzrasta do 45 minut. Ta informacja została przytoczona nieprecyzyjnie – z rysunku 1.5 można odczytać, że odporność 25 min. autorzy przypisali słupom o minimalnej powierzchni „materiału” równej co najmniej 35 calom kwadratowym (225 cm²), a wydłużenie czasu do 45 minut wynika nie tylko ze zbrojenia, ale także zwiększenia powierzchni „materiału” do najmniej 45 cali kwadratowych (290 cm²).

3.3 Ocena studiów literatury

Studia literaturowe obejmują zagadnienia, które uznają za właściwe, wybrane źródła są niewątpliwie związane z tematem i ważne. W ramach studiów literaturowych analizowano następujące zagadnienia:

- Historia badań ogniowych (p. 2) – gdzie przedstawiono, zmieniające się na przestrzeni wieków, podejście do klasyfikacji budynków i ich elementów ze względu zagrożenie pożarem oraz do klasyfikacji „palności” materiałów budowlanych; następnie opisano rozwój badań materiałów i elementów w warunkach działania wysokich temperatur, historię tworzenia krzywych standardowych *temperatura-czas* i ustalania parametrów badań zachowania się konstrukcji w całym procesie pożaru (zapalenie, rozwój pożaru i studzenie);
- Oddziaływania termiczne w czasie pożaru (p. 3) – przedyskutowano pojęcie konwekcyjnego i radiacyjnego przepływu ciepła oraz przepływu między środowiskiem pożarowym a elementem konstrukcyjnym;
- Właściwości betonu i stali w wysokich temperaturach (p.4);
- Eksperymenty i analizy teoretyczne słupów CFST (p. 5.1-5.4) – gdzie opisano badania ogniowe słupów CFST wraz z analizą ich parametrów i uzyskanych wyników, starannie selekcjonując te, które posłużyły później Doktorantowi do walidacji modelu numerycznego, omówiono także dokładność i wiarygodność pomiarów temperatury w piecu i wewnątrz słupa;
- Metody projektowania w warunkach normalnych i warunkach pożarowych (p. 5.5 i 5.6) – wbrew tytułowi opisano właściwie jedną tabelaryczną metodę normową projektowania na warunki pożarowe,
- Relacjonowane w literaturze próby modelowania numerycznego słupów CFST (p. 5.7),
- Wpływ różnych czynników na zachowanie się słupów CFST (p. 6) – jest to rozdział, w którym zawarte są nie tylko dane literaturowe, ale także pewne wyniki analiz numerycznych Doktoranta.

Studia literaturowe są niewątpliwie mocną stroną pracy. Przeprowadzone są bardzo starannie. Wymienione wyżej zagadnienia analizowano na podstawie źródeł literaturowych zarówno historycznych jak i najnowszych (do 2023 roku). Zestawiano też zalecenia Eurokodów i innych norm, a zalecenia normowe nie tylko przytaczano, ale podawano ich podstawy eksperymentalne i teoretyczne z fizykalnym opisem zjawisk. Omówiono także jakościowo i ilościowo zjawiska, które nie są detalicznie ujęte w normach projektowania (np. zjawiska w fazie studzenia). Wyprecyzowane są też braki i niedoskonałości relacjonowanych badań, których to braków należy unikać, aby dać kompletny opis zjawisk zachodzących w czasie badań.

Szczególnie wartościowy jest rozdział 6, gdzie prezentowane treści nawiązują wprost do programu badań Doktoranta. Analizy poszczególnych czynników wpływających na nośność smukłych słupów CFST kończą się konkluzjami wskazującymi na konieczność uwzględnienia danego czynnika w tworzonym modelu numerycznymi i oszacowaniem jego wartości.

Uwagi i pytania szczegółowe do części literaturowej są następujące:

Str. 53₃₋₁ i 54¹⁻⁶ oraz rys. 4.2 – Według opisu na str. 53, na rys. 4.2 zaprezentowano zależność ciepła właściwego betonu od temperatury według EC2-1-2 i EC4-1-2 dla zawartości wilgoci 3 i 6%. Zatem w legendzie powinno występować 2 razy EC2 (jest 1 raz) i 2 razy EC4 (jest 3 razy). Jest także niespójność rysunku z opisem na str. 54³⁻⁶ - z opisu wynika, że „plateau” występuje w modelu EC4, podczas, gdy na rysunku rys. 4.2 występuje ono w modelu EC2. Ponadto w normie EC2-1-2 na rys. 3.6 a pokazano zależności dla 1,5 i 3%, a normie EC4-1-2 na rys. 3.7 a pokazano zależności dla 3 i 10%, a nie jak podaje Autor - dla 3 i 6%.

Str. 85₂₁₋₂₀ – Wobec cytowanego przeze mnie już wcześniej stwierdzenia: *W wyniku tych testów okazało się, że metoda obliczeń zawarta w Eurokodzie 1994-1-2 nie jest bezpieczna dla słupów smukłych*, prosiłabym o pokazanie, które konkretnie wyniki badań wskazują na to, że metoda EC4-1-2 nie jest bezpieczna. Należałoby tu pokazać tryb obliczeń EC4-1-2 tego przypadku i wykazać, że wyniki obliczeń są po stronie niebezpiecznej.

- 86²¹ i 88¹¹, 90¹⁸ – Czy „load intensity”, „load ratio” i „load level” opisują tę samą wielkość? A później jeszcze „utilisation level” na str. 108¹⁰ i „load utilisation” na str. 113⁷.
- Str. 98 – Wbrew tytułowi p. 5.5 *Design methods at ambient conditions* nie ma tu informacji o projektowaniu słupów CFST w warunkach normalnych, a jedynie zestawiono kształty przekrojów takich słupów i stosowane materiały wypełniające.
- Str. 103 – Czy rys. 6.1 pokazujący zależność pionowego przemieszczenia słupa CFST od temperatury jest autorskim rysunkiem Doktoranta? Czy jest on sporządzony na podstawie danych literaturowych, czy własnej numeryki? Jeśli na podstawie danych literaturowych to należy dodać przywołanie pozycji literaturowej, a jeśli na podstawie własnych analiz, to powinien być umieszczony nie jako wstęp do analiz, ale jako ich wniosek.
- Str. 103 - W którym miejscu mierzone jest pionowe przemieszczenie pokazane na rys. 6.1? Domyślam się, że w osi słupa na jego górnej krawędzi, ale nie jest to jasno napisane. Co oznacza czerwona linia na rys. B?
- Str. 104 – Na jakiej podstawie wyróżniono trzy typy zachowań słupa CFST w warunkach pożaru – opis i rys. 6.2 (w opisie na rysunku są ich konkretne parametry – przemieszczenie pionowe i czasy). Należałoby podać pozycje literaturowe, chyba, że są to własne obserwacje - ale tu też trzeba byłoby podać podstawę – do tego miejsca w rozprawie jeszcze nie ma relacji z prac własnych.
- Str. 107₁ – Jak Autor rozumie pojęcie „zone for load introduction”? Czy było ono wykorzystywane w analizach Autora?
- Str. 114² – Jak obliczano “load bearing capacity”?

3.4 Ocena własnych analiz i badań Doktoranta

W pracy zaprezentowano rozwiązanie trzech częściowych problemów naukowych. Są to:

- opis zachowania słupa CFST w warunkach pożaru wraz z wyspecyfikowaniem parametrów wpływających na to zachowanie,
- ocena nośności resztkowej słupa CFST po pożarze,
- ocena możliwości zastosowania kompozytu cementowego zawierającego cenosferę jako materiału wypełniającego rurę stalową, poprawiającego zachowanie słupa CFST w warunkach pożaru w stosunku do wypełnienia betonem zwykłym.

Tak szerokie, wieloaspektowe potraktowanie zagadnienia i fakt, że w każdym z podjętych problemów uzyskano jednoznaczne wnioski o charakterze aplikacyjnym są niewątpliwie mocnymi stronami rozprawy.

Istotą rozwiązania pierwszego częściowego problemu naukowego było stworzenie modelu numerycznego słupa CFST, pozwalającego na analizę jego zachowania w warunkach pożaru. Był to model sparametryzowany tak, aby uwzględnić możliwie dużą liczbę czynników wpływających na wynik końcowy. Czynniki te oraz wyniki badań laboratoryjnych służące walidacji zostały przedyskutowane w ramach studiów literaturowych (parz p.3.2 recenzji) i utworzyły bazę danych. Istotne, że parametrami były nie tylko dane geometryczne słupów, rodzaj kruszywa w betonie i parametry wytrzymałościowe betonu i stali oraz postać krzywej *temperatura-czas*, ale także parametry górnego i dolnego podparcia. Uwzględnione zostały także: przewodność termiczna szczeliny między betonem i rurą, tarcie, emisyjność powierzchni stali, współczynnik przewodności cieplnej. Danymi były również materiałowe zależności konstytutywne materiałów konstrukcyjnych w temperaturze otoczenia, temperaturze pożaru i temperaturze popożarowej. Model został stworzony w programie Abaqus, do odczytu danych z bazy danych zastosowany był program *Matlab*, a do generowania plików wejściowych do Abaqusa służyły skrypty programu *Python*. Przeprowadzone zostały trzy etapy analizy modelu: analiza „statecznościowa” pozwalająca na określenie imperfekcji geometrycznych, analiza

przepływów ciepła, wreszcie analiza zachowania mechanicznego w warunkach pożaru (wykorzystująca wyniki dwóch poprzednich analiz).

Stworzony model numeryczny jest niewątpliwie osiągnięciem Doktoranta. Jego walidacja względem rzeczywistych wyników badań laboratoryjnych pozwoliła stwierdzić, że odchylenia wyników badań od wartości przewidywanej numerycznie wynoszą nie więcej niż 15%. Ten wynik przy tak skomplikowanym wieloaspektowym zadaniu należy uznać za dobry.

Sposób prezentacji wyników wskazuje na swobodę w operowaniu uzyskanymi danymi i umiejętność twórczej ich interpretacji. Analiza wpływu wyspecyfikowanych parametrów na zachowanie się słupa jest dojrzała i dogłębna. Szczególnie doceniam wynik wskazujący na zmianę udziałów betonowego rdzenia i rury stalowej w przenoszeniu obciążenia w czasie trwania pożaru i wpływ tej zmiany na typ zniszczenia (rys. 7.20-7.23) oraz wpływ podatności podpory i wytrzymałości betonu.

Szczegółowe pytania i uwagi do rozwiązania pierwszego problemu badawczego:

- Jako jeden z parametrów modelu przyjęto sposób podparcia górnego końca słupa (str. 122⁴-123¹⁻⁴). Przyjęto podparcie przegubowe (wariantowo - z możliwą podatnością pionową) lub sztywne (wariantowo - z możliwą podatnością obrotu w płaszczyznach pionowych). Jaki wpływ na wyniki miałyby uwzględnienie także podatności dolnej podpory, obrazującej podatność podłoża gruntowego?
- Jaka była przesłanka do przyjęcia imperfekcji równej $l/100$?
- Moim zdaniem, brakuje pokazania, chociażby przykładowych, map naprężeń na powierzchni i w przekrojach słupów.
- Dlaczego na rysunkach 7.16 przyjęto linię trendu w postaci liniowej? Wydaje się, że w co najmniej dwóch przypadkach lepsze byłoby dopasowanie nieliniowe.
- Jak Doktorant interpretuje fakt, że odporność ogniowa zmienia się przy zmianie sztywności między 10^7 N·mm/rad i 10^9 N·mm/rad, a nie w całym zakresie od 0 do ∞ (rys. 7.27)?
- Jak wygląda deformacja słupa w zależności od typu podpory? Rozumiem, że rysunek 7.23 dotyczy sytuacji, gdy górna podpora jest przegubowa. Nie znalazłam w pracy podobnego rysunku dla utwierdzenia ani porównania deformacji poziomej w tych dwóch przypadkach.
- Na str. 123⁸ podano, że jednym z parametrów modelu była liczba prętów zbrojeniowych (widoczne jest to także w tabelicy 7.1), natomiast w analizie parametrycznej nie znalazłam informacji np. na temat udziału prętów w przenoszeniu obciążenia i wpływu zbrojenia na odporność ogniową. Nieco dziwi ten brak, ponieważ już we wstępie do pracy podkreślano wpływ zbrojenia na odporność ogniową.

Drugim cząstkowym problemem naukowym, którego rozwiązanie jest osiągnięciem Autora, jest wykorzystanie stworzonego modelu do analizy zachowania słupów CFST po pożarze i określenia „nośności resztkowej”. Analiza została wykonana za pomocą sprzęgnięcia komputerowej mechaniki płynów (symulator dynamiki pożaru) i metody elementów skończonych. Wykracza ona poza klasyczne projektowanie konstrukcji na warunki pożarowe, w którym wykorzystywane są krzywe *temperatura-czas* nie mające części opadającej, a więc nie uwzględniające studzenia i dalszej pracy statycznej „dotkniętej” pożarem konstrukcji. Podkreślić trzeba, że analizy numeryczne konstrukcji po pożarze są unikatowe, a są one ważne szczególnie dlatego, że nie ma pełnoskalowych eksperymentów w tym zakresie.

Istotnym efektem prac Doktoranta jest udowodnienie, że minimalna nośność słupa wystąpi nie w czasie jego nagrzewania, ale w czasie studzenia, a powodem jest termiczna inercja betonu. Cennym jest wykorzystanie stworzonego modelu w studium przypadku słupów w garażu podziemnym, gdzie analiza termiczno-statyczna została poprzedzona opracowaniem scenariusza pożaru. Udowodniono, że liczba samochodów objętych pożarem wpływa na odpowiedź termiczną i statyczną słupów, w tym na zachowanie popożarowe. Odpowiedź ta zależy także od wartości przyłożonego obciążenia.

Szczegółowe pytania do rozwiązania drugiego problemu badawczego:

- Str. 171_{5,9} – Dlaczego w scenariuszu nie biorą udziału samochody oznaczone "3"?
- Str. 177 – Opis histogramu na rys. 8.13 jest nie bardzo jasny. Pokazuje on *względna częstość*, jak rozumiem, występowania temperatury o określonej wartości. Ale gdzie - na określonym poziomie czy na całej powierzchni? Co sumuje się do jedności (to nie bardzo wynika z histogramu)?

Trzeci cząstkowy problem naukowy dotyczy oceny efektywności zastosowania kompozytu cementowego z lekkim wypełniaczem (cenosfera popiołu lotnego) w słupach CFST w celu uzyskania lepszej nośności ogniowej niż w przypadku słupów CFST wypełnionych betonem zwykłym. Analiza danych literaturowych stworzyła przesłanki do wniosku, że kompozyty cementowe zawierające cenosferę wykazują znaczną odporność ogniową.

Pierwszym etapem prac były badania laboratoryjne kompozytów zawierających *cenosferę*, zarówno ich cech fizycznych i wytrzymałościowych (gęstość, wytrzymałość na zginanie i ściskanie, moduł sprężystości pod obciążeniem monotonicznym i cyklicznym), badania struktury po wygrzewaniu do 1200°C (analiza termogravimetryczna i mikroskopowa), jak i parametrów termicznych (ciepło właściwe, współczynnik przewodności cieplnej, dyfuzja termiczna). Przeprowadzenie tych badań dowodzi swobody, z jaką porusza się Doktorant w laboratorium, operując różnorodnym sprzętem (mikroskop skaningowy, termogravimetr, maszyny wytrzymałościowe, kalorymetr, szybkie kamery). Uzyskane wyniki posłużyły do określenia wartości parametrów modelu numerycznego zaadaptowanego do analizowanego kompozytu. Zwraca uwagę staranna analiza służąca ustaleniu krzywej σ - ϵ i badania dyfuzji termicznej wykonane, aby potwierdzić przyjęty model zmian parametrów termicznych. Szczegółowe pytania i uwagi do badań laboratoryjnych i ich wyników są następujące:

- W tabelicy 9.2 podano jedynie proporcje składników. Ile kg cementu użyto w 1m³ kompozytu z *cenosferą* w stosunku do ilości cementu w zaprawie?
- Jaka była konsystencja kompozytów? To istotne, szczególnie jeśli mają służyć do wypełnienia rury.
- W mojej opinii wyniki badań gęstości i wytrzymałości pokazano w tablicach 9.3 i 9.4 nieco zbyt oszczędnie. Podano tylko wartości uzyskane przed wygrzewaniem, dla udokumentowania badań należało albo pokazać wszystkie w tablicach albo pełne wyniki zamieścić w załączniku.
- Także relacje badań termicznych są oszczędne - w przypadku badania ciepła właściwego podano jedynie skróty nazw metod badawczych i wyniki bez przywołania procedur i stosowanych urządzeń; podobnie przewodność cieplna. W przeciwieństwie do wymienionych badanie modułu sprężystości jest bardzo dobrze opisane str. 206.
- Nie napisano, jaka była liczba próbek w każdej serii badania gęstości i wytrzymałości. Czy wartości pokazane w tabelicy 9.3 i na rysunku 9.7, 9.8, 9.9 są wartościami średnimi? To powinno być napisane w podpisach tablic i rysunków. Podobnie - ciepło właściwe i przewodność cieplna.
- Na str. 190¹² napisano, że na rysunkach 9.7-9.9 „error bars” reprezentują dwa odchylenia standardowe. O jakie dwa odchylenia chodzi?
- Na rys. 9.8 widać, że rozrzuty resztkowej wytrzymałości na zginanie są bardzo duże - „widelki” sięgają sąsiadujących krzywych. Nie można zatem na ich podstawie jasno wnioskować o wpływie składu kompozytu na spadek tej wytrzymałości. Na str. 192_{9,8} napisano, że wszystkie kompozyty do 400°C miały „podobny” spadek wytrzymałości. Czy 95 i 80% to spadek „podobny” (rys. 9.9)? Wydaje się, że jeden z wyników badania kompozytu 0.30/0.25 w temperaturze 400°C był niemiernodajny, co podniosło wartość średnią. Podobnie, aby stwierdzić *nie znaleziono żadnych istotnych różnic między*

zachowaniem się kompozytu z włóknami i bez włókien (str. 193¹⁰⁻¹¹) trzeba byłoby wykonać analizę statystyczną.

- Czym się różnią, pokazane na rysunku 9.18, „FAC-pastes” i „FAC composites”? Czy różnią się od używanego w rozprawie LCCC?
- Co pokazują 4 wykresy składowe rys. 9.36 i 9.37 (nie zostały podpisane)?

W następnym, ostatnim w rozprawie kroku, dokonano analizy parametrycznej stworzonego modelu numerycznego obliczając 50 słupów, które stanowiły bazę do walidacji tego modelu w części pierwszej pracy. Zmieniano 5 parametrów: wytrzymałość tworzywa wypełniającego rurę (oryginalna, oryginalna zwiększona o 10 lub 20% lub jednakowa dla wszystkich słupów 54 i 63 MPa), zależność σ - ϵ (zależność dla betonu zgodna z EC2 lub zależność Popovica zaadaptowana przez Doktoranta dla kompozytu z cenosferą, przy czym wariantowany był parametr opisujący część opadającą $n = 9$ lub 4), współczynnik redukcyjny wytrzymałości (taki jak dla betonu według EC2 lub zbadany przez Doktoranta w dwóch wariantach – na małych próbkach pryzmatycznych i na próbkach cylindrycznych) oraz parametry termiczne (takie jak dla betonu lub zbadane dla kompozytu z cenosferą). W efekcie Doktorant wysnuł wniosek, że sterując wyżej wymienionymi parametrami można zwiększyć odporność ogniową do zadanego poziomu. Ten etap prac świadczy o twórczym podejściu Doktoranta do zastanego stanu techniki i nauki. Mam tu jednak uwagi wyspecyfikowane niżej:

- Badano parametry wytrzymałościowe i termiczne kompozytu składającego się jedynie z cementu, mikrokrzemionki, *cenosfery* i wody. Tymczasem do wypełnienia rur służy raczej beton z kruszywem grubym. Jaki, zdaniem Doktoranta jest wpływ kruszywa grubego na badane cechy termiczne i w konsekwencji jak to będzie skutkować dla odporności ogniowej słupów CFST?
- Jeden z badanych wstępnie kompozytów z cenosferą miał w składzie włókna polipropylenowe (tablica 9.32). Czy parametry podane w p. 9.3 będą odpowiednie zarówno dla kompozytów z włóknami i bez nich?
- Wytrzymałość na ściskanie zbadana na „małych” pryzmatycznych próbkach nie może być utożsamiana z wytrzymałością betonu na próbkach standardowych. Ze względu na efekt skali należy przy porównaniach dokonywać przeliczenia.
- W analizie parametrycznej stosowano, nieadekwatne do rzeczywistości, wariantowanie parametrów. Otóż w poszczególnych przypadkach „pomieszane” są parametry betonu i parametry kompozytu z cenosferą (np. w przypadku 1 wzięto wytrzymałość, charakterystykę σ - ϵ i współczynnik redukcyjny wytrzymałości jak dla betonu, a parametry termiczne – jak dla kompozytu z cenosferą). Moim zdaniem, aby porównania były miarodajne należałoby używać wszystkich parametrów betonu, albo wszystkich parametrów kompozytu.
- Dlaczego do analiz w przypadkach 7, 8, 9 wybrano wytrzymałość 63 MPa?
- Jak rozumiem, Doktorant wariantując parametr n opadającej części krzywej σ - ϵ uzyskał najkorzystniejsze efekty przy $n = 4$. Postuluje On zatem, aby tworzyć materiał, który miałby taką właśnie charakterystykę (choć z rys. 9.49 wynika, że pomimo średniego przyrostu odporności ogniowej o ponad 107%, niemal 20 słupów ma niewielkie przyrosty wytrzymałości). Jaki składnik betonu mógłby, zdaniem Doktoranta, spowodować taką właśnie pożądaną zmianę? Pamiętać jednak trzeba, że spowodowałaby on także zmianę innych parametrów betonu.

3.6 Ocena podsumowania i wniosków pracy

W ostatnim rozdziale zamieszczone jest podsumowanie pracy. Jest to podsumowanie opisowe. W opisie tym ważne obserwacje z analiz numerycznych przeplatają się z informacjami mniej ważnymi np. opisem zalet termometrów płytkowych.

Wypunktowane jednoznacznie są jedynie wnioski z eksperymentów nad kompozytem zawierającym cenosferę. Szkoda, że wnioski z analiz numerycznych słupów CFST w czasie pożaru i w warunkach popożarowych nie zostały też ujęte w ten sposób. Zestawione ogólnie zalecenia dotyczące sposobu i zakresu badań słupów CCFST oraz sposobu podawania wyników tak, aby mogły stanowić wiarygodną bazę do porównań i sformułowania zasad szacowania ich odporności ogniowej, powinny być jedynie jednym z wniosków.

Ogólnie - wobec braku „wypunktowania” wniosków osiągnięcia Doktoranta są nieco „zawoalowane”. Nie ma też jednoznacznego stwierdzenia o osiągnięciu założonego celu i udowodnieniu przyjętej tezy.

Na zakończenie Doktorant sformułował dalsze kierunki badań, które obejmują analizy i badania słupów z materiałów innych niż stal (np. stal nierdzewna, kompozyty zbrojone włóknem węglowym) z wypełnieniem innym niż beton zwykły. Planuje także rozwijać kompozyty zawierające cenosferę, aby uzyskać kompozyt bardziej plastyczne.

4. Ocena strony redakcyjnej pracy

Praca jest napisana jest poprawnym, bogatym językiem. Jednak podczas lektury odnosi się wrażenie, że Doktorant - sam będąc świetnie zorientowany w temacie i operując ze swobodą na wielu płaszczyznach analizy - niekiedy przecenia intuicję czytelnika (niepełne opisy czy podpisy rysunków, podawanie informacji „nie po kolei”). Uwagi redakcyjne, z których najważniejsze zestawiałam poniżej, nie mają wpływu na merytoryczną ocenę pracy:

- W tekście dla określenia norm EN 1992-1-2 i EN 1994-1-2 używano określenia Eurocode 2 i Eurocode 4 bez sprecyzowania, że chodzi o część „pożarową” (np. str. 53-54). Tak można postępować, ale we wstępie należało napisać, że taką konwencję przyjęto.
- Na rysunku 1.6 przytoczono w języku polskim fragment tablicy z pracy z 1975 roku. Należało podać tłumaczenie zawartych tu danych, bowiem językiem rozprawy jest język angielski.
- Str.27 – Tytuł rozdziału *Pre-standarised fire resistance* powinien brzmieć *Pre-standarised requirements and assessment for fire resistance*, bo odporność pożarowa nie zmieniła się po wprowadzeniu norm, zmieniły się tylko rekomendacje.
- Miejsca zamieszczenia niektórych fragmentów tekstu są dyskusyjne, np.
 - o Choć tytuł podrozdziału 1.2 brzmi *Early CFST design rules*, czytelnik nie znajduje tu informacji na temat zasad obliczania nośności tych słupów sformułowanych w początkach stosowania CFST. Zauważono tu natomiast brak informacji o słupach CFST w „*Warunkach technicznych ...*” z roku 1961 i wytycznych ITB do oceny odporności ogniowej z roku 1979, a przecież nie są to dokumenty podające zasady projektowania. Adekwatnym do zawartości tytuł brzmiałby „*Wczesne zasady oceny (lub przewidywania) nośności słupów CFST w warunkach pożarowych*”.
 - o Fragment na str. 118₁₀₋₁ traktuje o wytrzymałości betonu i nie „pasuje” do rozdziału zatytułowanego *The moisture content of concrete*. Powinien być w rozdziale 6.2.4.
 - o Na str. 131 pojawia się informacja dotycząca ograniczenia skrócenia pionowego w zależności od długości słupa, ale wcześniej nie podano jaka jest konkretnie długość modelowanych słupów – jest ona dopiero w tablicy 7.1 na str. 133.
- Występują niepełne opisy na rysunkach i w tablicach, nieprecyzyjne podpisy rysunków, a także pomyłki np.:
 - o Na rys. 1.6 ani w jego podpisie nie wytłumaczono co jest podane w przywołanej tu tablicy (brak wiersza nagłówkowego) i co oznaczają zawarte tu symbole ϕ , C , D , E . W jakich jednostkach podane są wartości a i ϕ ?
 - o Na podstawie jakiego źródła podano wzory (6.1) i (6.20)?

- Czym są symbole w legendzie rysunku 6.5? Nie wyjaśnia tego ani podpis rysunku ani tekst. Podobnie nie podpisano legendy na rys. 8.4 i 8.5.
 - W podpisie rys 7.9 podano, że pokazano tu przemieszczenie pionowe słupa C23 z badań *Lie and Chabot*, a tymczasem jest to porównanie tego przemieszczenia z przemieszczeniem uzyskanym na modelu.
 - Nie podano, które przypadki obliczeniowe pokazano na rysunkach składowych rysunku 7.17.
 - Przywołując na str.142² rysunek 7.18 dla ilustracji braku klarownych symptomów osiągnięcia nośności, należało w tekście opisać w czym ten brak na tym rysunku się przejawia - rysunek ten poświęcony jest zagadnieniu tarcia i składa się z dwóch rysunków.
 - Podpis rysunku 7.28 jest enigmatyczny („behaviour of column”), a na rysunku oś pionowa podpisana jest „displacement” - w którym kierunku? którego punktu?.
 - Co oznacza 30/F-rot100M i 50/F-rot100M w legendzie rysunku 7.26?
 - Tablica 9.2 została zatytułowana „mix proportions” ale nie można z niej odczytać wprost składu, bowiem nieprecyzyjny jest wiersz nagłówekowy. Np. drugą kolumnę zatytułowano FAC, podczas gdy ze str. 188₅ dowiadujemy się, że jest to stosunek FAC do spoiwa; piątą kolumnę zatytułowano „water + SP”, a ze str. 188₅ dowiadujemy się, że jest to stosunek wody do spoiwa zasumowanego z superplastyfikatorem. Gdyby tytuł tablicy brzmiał „Skład kompozytu – stosunek poszczególnych składników do spoiwa” – byłoby wszystko jasne.
 - W podpisie rysunku 8.6 powinno chyba być 159 x 6, a jest 219,1 x 6.
 - Parametr na wykresach rysunku 8.9 to HRR (jak podano w podpisie rysunku) czy RHR (jak podano opisując osie pionowe)?
 - Wartość 1024,7 kW/m² to chyba HRRPUA, a nie HRR jak opisano to w siódmym wierszu tablicy 8.2.
- Występują nieprawidłowe przywołania lub ich brak, np.
- Na str. 108₁ przywołano rys. 6.7 zamiast 6.6,
 - Nie podano pozycji literaturowej, z której zaczerpnięto rys. 6.16.
 - Czy rys. 9.3 jest rysunkiem autorskim? Jeśli tak, należało to podkreślić.
 - W przywołanej w podpisie rysunku pracy *Szymkuć2023b* tego rysunku nie ma.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest niewątpliwie dziełem oryginalnym i samodzielnym. Doktorant podjął ważne zagadnienie, które konsekwentnie rozwiązywał. Wykazał się wiedzą teoretyczną z zakresu podjętej tematyki, umiejętnością modelowania numerycznego i realizacji eksperymentów oraz twórczej analizy wyników obliczeń i badań. Rozprawa świadczy o bardzo dobrym opanowaniu przez Doktoranta warsztatu badań naukowych.

Ostatecznie stwierdzam, że przedłożona rozprawa mgr inż. Wojciecha Szymkucia pt. ANALYSIS OF BEHAVIOUR AND RESIDUAL CAPACITY OF FIRE CONCRETE-FILLED TUBULAR COLUMNS spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki”. Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Lublin dn. 20.02.2024