

Warszawa, dnia 27. 05. 2020 r.

Dr hab. inż. **Robert Kowalski**, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej
Instytut Inżynierii Budowlanej

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Mróz pt.

Assessment of spalling risk in concrete subjected to fire Ocena ryzyka eksplozyjnego odpryskiwania betonu w pożarze


1. Formalna podstawa recenzji

Formalną podstawę recenzji stanowi umowa o dzieło, zawarta w dniu 17. 04. 2020 r. pomiędzy Politechniką Krakowską im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, a recenzentem – dr. hab. inż. Robertem Kowalskim, prof. uczelni, z Politechniki Warszawskiej.

Recenzję sporządzono na podstawie przepisów Ustawy z dnia 14. marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 z 2003 r., poz. 595, z późniejszymi zmianami) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19. stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261, z późniejszymi zmianami).

W wymienionej wyżej umowie, m.in. znajduje się zapis, że recenzent *zobowiązuje się do ponownej oceny i opracowania recenzji poprawionej lub uzupełnionej rozprawy*. W związku z powyższym, w recenzji, oprócz ogólnej oceny rozprawy podano również najistotniejsze uwagi mające charakter recenzji wydawniczej. Mniej istotne, szczegółowe uwagi o charakterze wydawniczym zapisano w pliku zawierającym tekst rozprawy, który recenzent przekazał bezpośrednio Autorce.

Zgodnie z ustaleniami poczynionymi pomiędzy przedstawicielami Politechniki Krakowskiej, a recenzentem, pomimo tego, że rozprawa jest napisana w języku angielskim, recenzję sporządzono w języku polskim.

D Z I E K A N A T	
Wydziału Inżynierii Lądowej	
Wpłynęło dnia.....	27.05.2020
L. dz.	LO. 510.1.3.2020
podpis.....	



2. Ogólna charakterystyka rozprawy, wstępna ocena

Jak już podano wyżej omawiana tu rozprawa jest napisana w języku angielskim. Jej zasadniczy tekst liczy 146 stron i jest podzielony na 6 rozdziałów. Przed zasadniczym tekstem znajdują się podziękowania Autorki rodzinie, spis treści oraz streszczenie. Po zasadniczym tekście znajduje się, zajmująca 6 stron bibliografia, której pozycje podano w kolejności alfabetycznej nazwisk autorów, bez numeracji. Po bibliografii umieszczono, liczący 87 stron załącznik, w którym podano wyniki zasadniczych eksperymentów. Na końcu znajduje się rozdział *Streszczenie i zakres pracy* napisany w języku polskim. Całość tekstu rozprawy zajmuje 252 strony.

Rozdział pierwszy rozprawy, zatytułowany *Wprowadzenie (Introduction)* liczy 7 stron. Po nienumerowanym wstępie, w którym m.in. przedstawiono rys historyczny występowania, obserwacji i badań odpryskiwania termicznego betonu narażonego na warunki pożarowe, znajdują się cztery podrozdziały: *Cel badań (Objectives of research)*, *Uzasadnienie podjęcia się rozpatrywanych problemów (Justification for tackling chosen scientific problems)*, *Tezy, hipotezy (Thesis' hypotheses)* i *Zakres pracy (Scope of work)*. Przedstawiony cel pracy: ... *porównanie intensywności i form odpryskiwania betonu poddanego działaniu pożaru przy zastosowaniu różnych procedur badawczych* ... jest jednoznaczny i „zapowiada” bardzo ciekawą lekturę na temat bardzo ważnego zagadnienia. Uzasadnienie istoty rozpatrywanego problemu jest trafne, aczkolwiek fragmenty mające charakter opisu życiorysu zawodowego Autorki nie koniecznie powinny zajmować miejsce w tekście naukowym.

Wątpliwości recenzenta budzą natomiast sformułowane tezy. Jest ich aż pięć, są ogólne, a po głębszym przeanalizowaniu wydają się oczywiste (tym bardziej, iż w pracy zostały one nazwane jedynie hipotezami). Przy obecnym poziomie wiedzy do sformułowania tak zapisanych tez nie są potrzebne jakiegokolwiek badania. Odnosi się wrażenie, że tezy zostały sformułowane „na siłę”, jedynie w celu spełnienia (nieobowiązującego przecież bezwzględnie) wymagania, aby rozprawa doktorska zawierała tezy.

Opis zakresu pracy, niepotrzebnie ma charakter streszczenia. Referowanie tego, co zawierają poszczególne rozdziały pracy powinno znaleźć miejsce w streszczeniu (*Abstract*) zamieszczonym przed zasadniczym tekstem. W opisie zakresu pracy wystarczyło podkreślić to, czego ona dotyczy, ale przede wszystkim należało jednoznacznie opisać jej ograniczenia, np., że nie zajmowano się wpływem zawartości wilgoci w betonie oraz, że badano elementy wykonane z tylko jednej mieszanki betonowej (tylko jeden rodzaj/przypadek betonu).

Rozdział drugi rozprawy, zatytułowany *Studia literatury (Literature study)* liczy 48 stron i jest podzielony na 6 podrozdziałów poprzedzonych krótkim wstępem. W podrozdziale pierwszym (*Causes and mechanism of fire spalling of concrete*), na 10. stronach opisano przyczyny i „mechanizm” występowania odpryskiwania termicznego betonu. Podane

informacje są obszerne, wręcz wyczerpujące. Niedosyt budzi jednak, że dopiero na 8. str. omawianego podrozdziału (na 27. stronie pracy), tak naprawdę zwrócono uwagę, że jednym z najistotniejszych czynników mających wpływ na występowanie odpryskiwania termicznego betonu jest duża zawartość wilgoci w betonie. W podrozdziale drugim (*Assessment of concrete resistance to fire spalling*), na 20. stronach przedstawiono obszerny przegląd stanowisk służących do badania eksperymentalnego odpryskiwania termicznego betonu w małej, średniej i pełnej skali, z obciążeniem lub bez udziału obciążenia. W podrozdziale trzecim (*Effect of stress state on fire spalling of concrete*), na sześciu stronach opisano badania mające na celu określenie wpływu stanu naprężenia w betonie na skłonność do występowania odpryskiwania termicznego. Opis podzielono na badania elementów, w których występowanie naprężeń ściskających wymuszano siłą zewnętrzną, w wyniku skrępowania ogrzewanego betonu betonem nieogrzewanym, znajdującym się wokół części ogrzewanej (tzw. *cold rim*) oraz skrępowania zewnętrzną obręczą stalową. W podrozdziale czwartym (*Thermal strains of concrete exposed to fire*), na czterech stronach omówiono odkształcalność betonu ogrzewanego do wysokiej temperatury pod działaniem obciążenia. W podanym opisie brakuje jednak uwypuklenia, że omawiane odkształcenia bardzo istotnie zależą od wartości naprężeń ściskających występujących w betonie podczas ogrzewania (por. też uwagi 3.2.1 i 3.2.2 tej recenzji). W podrozdziale piątym (*Measurement of strains of concrete exposed to fire*), na pięciu stronach podano opis możliwości mierzenia odkształceń ogrzewanego betonu. Szczególnie dużo uwagi poświęcono przedstawieniu rozwinięcia metody cyfrowej korelacji obrazu (*Digital Image Correlation; DIC*) opracowanej wcześniej w macierzystej uczelni Autorki. W podrozdziale szóstym podsumowano przedstawione informacje.

Podsumowując wstępną ocenę studiów literatury przeprowadzonych przez Autorkę recenzent stwierdza, że przedstawiła Ona obszerny, ciekawy i wręcz wyczerpujący opis aktualnego stanu wiedzy na temat rozpatrywanego zagadnienia.

Rozdział trzeci, zatytułowany *Program i metodyka badań (Research program and methodology)* liczy 44 strony i jest podzielony na 3 podrozdziały, przed którymi umieszczono schemat blokowy przeprowadzonych eksperymentów.

W podrozdziale pierwszym (*3.1 Preliminary tests on feasibility of research objectives*), na 20. stronach opisano dwa badania wstępne.

W pierwszym z nich (podrozdział 3.1.1) opisano badania mające na celu dobór mieszanki do badań zasadniczych. Opisano badania siedmiu płyt o wymiarach 100 x 120 cm, grubości 30 cm, wykonanych z siedmiu różnych betonów, ogrzewanych z jednej strony wg tzw. krzywej standardowej. W tekście rozprawy nie podano jednak, ile czasu upłynęło od zabetonowania elementów do ich badania w piecu oraz jaka była zawartość wilgoci w betonie przed rozpoczęciem ogrzewania. Brak tego opisu może budzić poważny niedosyt, ponieważ intensywność odpryskiwania termicznego istotnie zależy od wilgotności betonu. Wątpliwości budzą też wnioski sformułowane na podstawie omawianego tu badania.

Trudno jest się zgodzić ze stwierdzeniem, że nieogrzewane obrzeże części ogrzewanej (tzw. *Cold rim*) o szerokości 12.5 cm jest w stanie „utrzymać” rozszerzający się ogrzewany środek elementu o szerokości 60 cm. Mniej nagrzaną beton części zewnętrznej popękał, czego można się było spodziewać. Aby to przewidzieć wystarczyło przecież przeanalizować równowagę sił w przekroju elementu (tzn. określić siłę, jaką może przenieść „zimna obręcz” przy naprężeniach rozciągających nieprzekraczających wytrzymałości betonu na rozciąganie i na tej podstawie obliczyć, jakie naprężenia ściskające mogą powstać w środkowej, ogrzewanej części elementu). Niedosyt budzi również brak przedstawienia analizy, w jaki sposób wyniki badań wstępnych wykorzystano do planowania badań zasadniczych. We wnioskach podsumowujących badanie wstępne nie podano jednoznacznie, jaki beton wybrano do dalszych eksperymentów i dlaczego.

Drugie badanie wstępne miało na celu sprawdzenie czy metoda cyfrowej korelacji obrazu (*Digital Image Correlation; DIC*), rozwinięta i stosowana w Politechnice Krakowskiej będzie mogła być zastosowana w zasadniczych badaniach Autorki. Uzyskano pozytywne wyniki.

W podrozdziale drugim (3.2 *Tested material and specimens preparation*), liczącym półtorej strony podano informację na temat składu mieszanki betonu (tab. 3.4, str. 87) zastosowanego do wykonania elementów do zasadniczych badań oraz liczby i wymiarów elementów (tab. 3.5, str. 88). Do badań w wysokiej temperaturze, w sumie przygotowano 21 płyt (7 rodzajów płyt; 3 powtórzenia). W „rejonie” tabeli (3.5), w której zestawiono opis badanych elementów brakuje jednak informacji, że do zasadniczych badań odpryskiwania termicznego betonu wykorzystano tylko po dwa elementy każdego rodzaju. Informacje tę można znaleźć dopiero w dalszej części pracy (we wstępie do podrozdziału 4.2, na str. 109).

W omawianym podrozdziale, w zasadzie przy okazji, podano też bardzo istotną informację (której brakuje w opisie badań wstępnych), że zasadnicze badania w wysokiej temperaturze przeprowadzono po upływie 300-330 dni od zabetonowania elementów.

W podrozdziale trzecim (3.3 *Setup and test procedures*), na 11. stronach przedstawiono opis zastosowanych procedur badawczych. Opisano procedurę (RILEM) ogrzewania próbek do badań wstępnych, przebudowę posiadanego pieca (tzw. *Dragon*), mającą na celu umożliwienie ściskania badanych elementów, warianty obciążania lub krępowania odkształceń badanych elementów, sposób rejestracji efektów akustycznych odpryskiwania betonu, sposób pomiarów deformacji górnej, nieogrzewanej powierzchni elementów. W opisie wariantów badania elementów w piecu brakuje jasnego i jednoznacznego zestawienia, jaką liczbę elementów zbadano w każdej z zastosowanych konfiguracji.

Rozdział czwarty, zatytułowany *Wyniki badań i ich dyskusja (analiza) (Experimental results and discussion)* liczy 41 stron i jest podzielony na 2 podrozdziały.

W pierwszym z nich (*Initial and residual properties of tested concrete*) na ośmiu stronach podano i przeanalizowano wyniki badań małych próbek (badania wstępne) w zwykłej temperaturze oraz po ogrzaniu i swobodnym ostudzeniu (*residual*). Otrzymano nieduże rozrzuty wyników, co świadczy o jednorodności zastosowanej mieszanki betonowej i rzetelnym przeprowadzeniu badań. Niedosyt recenzenta budzi jednak brak jakiegokolwiek porównania uzyskanych wyników z zaleceniami normowymi (np. Eurokodu 2-1-2 i normy amerykańskiej). Warto również zwrócić uwagę, że zastosowana procedura ogrzewania próbek (wg RILEM, por. rys. 3.28, str. 88), w której prędkość wzrostu temperatury wynosi $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ nie odpowiada warunkom, w jakich zazwyczaj znajduje się beton w konstrukcji narażonej na warunki pożarowe. Uzyskanych wyników nie należy zatem bezkrytycznie utożsamiać z zachowaniem się betonu w elementach ogrzewanych w piecu podczas badań zasadniczych. Szczególnie wysokie wartości wyników uzyskano w przypadku resztkowej wytrzymałości betonu na rozciąganie (rys. 4.3). W pracy przydałby się komentarz na ten temat. Ponadto w pracy brakuje odniesienia wyników uzyskanych na małych próbkach (badania wstępne) do wyników badań zasadniczych przeprowadzonych na dużych elementach w piecu gazowym. Powoduje to, iż odnosi się wrażenie, że badania wstępne były zbyt obszerne w stosunku do tego, jak później wykorzystano ich wyniki.

W podrozdziale drugim (*Results and discussion of fire tests on Dragon furnace*) na 33. stronach, podano i przeanalizowano wyniki badań zasadniczych (tzn. przeprowadzonych w piecu gazowym).

We nienumerowanym wstępie do omawianego tu podrozdziału przedstawiono opis pomiarów temperatury. Treść wstępu nie odpowiada zatem w pełni tytułowi podrozdziału. Opis prowadzenia pomiarów powinien być umieszczony w rozdziale dotyczącym procedur badawczych (tzn. w 3.). Należy też odnotować, że dopiero na podstawie omawianego tu opisu (str. 109) czytelnik dowiaduje się jednoznacznie, że do każdego z siedmiu przypadków skrupowania (lub nieskrupowania) płyt, jedną z przygotowanych trzech płyt zbadano tylko w celu określenia profilu temperatury, a dwie pozostałe wykorzystano do badania odpryskiwania betonu. Informacja ta powinna być podana wcześniej, „w rejonie” występowania tabeli 3.5 (str. 88).

Wyniki zasadniczych badań i ich analizę przedstawiono w czterech podpunktach.

Pierwszy z nich (*Temperature profile in concrete slab exposed to fire*) zajmuje nieco ponad stronę i podano w nim jedynie przykłady rozkładu temperatury w badaniu elementu nieskrupowanego oraz ściskanego w dwóch kierunkach. Brakuje natomiast porównania wyników poszczególnych badań. Niedosyt budzi też brak pomiarów mających na celu zbadanie lub umożliwienie przeanalizowania (np. obliczenia) pola temperatury występującego na brzegu badanych elementów.

Podpunkt drugi (*Spalling events and observations during fire tests*) zajmuje nieco ponad 7 stron i dotyczy obserwacji odpryskiwania betonu poczynionych podczas badań i po ich zakończeniu. Szczególnie cenne jest tu zestawienie najistotniejszych informacji o

odpryskiwaniu, podanych w tab. 4.6 (str. 114) oraz o ubytkach przekroju spowodowanych odpryskiwaniem, podanych na rys. 4.16 i 4.17 (str. 118). Nie wiadomo jednak dlaczego w tabeli podano po dwa wyniki badań (dwóch powtórzeń), a na rysunkach tylko jeden wynik. Nie wyjaśniono też jednoznacznie, czy jest to wartość średnia, czy może wynik jednej próby.

Podpunkt trzeci (*Results and analysis of sound records*) zajmuje osiem stron i dotyczy analizy zarejestrowanych efektów akustycznych. W podsumowaniu podano (rys. 4.23, str. 125) zależności między częstotliwością sygnału akustycznego, a rodzajem występującego wtedy odpryskiwania. Nie wyjaśniono jednak, dlaczego w analizach i na rysunku występują wyniki tylko sześciu badanych przypadków (a nie siedem).

Podpunkt czwarty (*Measurement of strains and crack propagation by DIC*) zajmuje 15 stron i dotyczy cyfrowej analizy obrazu (*Digital Image Correlation (DIC)*) deformacji górnej powierzchni badanych elementów. W wyniku przeprowadzonych analiz podano wyniki wirtualnych pomiarów odkształceń oraz szerokości rys. Czytelnikowi byłoby znacznie łatwiej odebrać podane analizy, gdyby informacje podane na rys. 4.27-4.29, 4.33, 4.39, 4.40, 4.42 były bardziej ujednolicone (gdyby np. podano, czego dotyczą części a), b) lub c) oraz na wszystkich rysunkach jednoznacznie określono by kierunki X i Y).

Podsumowując wstępną ocenę tego podrozdziału recenzent stwierdza, że Autorka przedstawiła bardzo ciekawe wyniki badań i analiz, które wnoszą istotny wkład w rozwój wiedzy na temat zjawiska odpryskiwania termicznego betonu. Niedosyt pozostawia jednak zbyt skrótowe przechodzenie od „suchych” wyników podanych w załączniku (tzn. w rozdziale 8.) do analiz i podsumowań przedstawionych w omawianym podrozdziale. Problem ten omówiono szerzej w punkcie 3.1.2 recenzji.

Rozdział piąty, zatytułowany *Uwagi końcowe (Concluding remarks)* zajmuje 6 stron i jest podzielony na aż 5 krótkich podrozdziałów.

Pierwszy z nich (*General*) ma charakter streszczenia i zdaniem recenzenta w ogóle jest niepotrzebny. W drugim (*Observation on restraint level of concrete thermal dilation*), którego tytuł wskazuje na podsumowanie wniosków dotyczących wpływu skrzepowania badanych elementów na rozszerzalność termiczną betonu sformułowano osiem punktów, z których nie wszystkie wydają się zasługiwać na umieszczenie w uwagach końcowych (np. pkt 1), a niektóre mają niewystarczająco mocne umocowanie w analizach przeprowadzonych w 4. rozdziale rozprawy, a wręcz mogą się wydawać kontrowersyjne lub nawet nieuprawnione (np. punkty 4 i 5). Podrozdział trzeci (*Confirmation of hypotheses*), jak wskazuje tytuł ma służyć potwierdzeniu tez postawionych w podrozdziale 1.2. Jak już wskazano podczas omawiania tego rozdziału, postawione przez Autorkę tezy są bardzo ogólne. Odniesienie się do nich w omawianym tu podrozdziale ma podobny charakter. Ponadto wątpliwości budzi fakt, że w pracy sformułowano 5 tez, a w celu podsumowania ich udowodnienia przedstawiono 6 punktów. Niefortunne wydaje się też

„niby” cytowanie postawionych tez na początku każdego z punktów omawianego podrozdziału. Albo należałoby zacytować tezy dosłownie, albo odnieść się do każdej z nich bez cytowania. Podrozdział czwarty (*Additional finding on the basis of 14 fire test on 7 test configurations*) ma tytuł nieproporcjonalnie długi w stosunku do tekstu (jeden akapit, 8 wierszy), jednak poruszony w nim problem jest bardzo istotny (por. uwaga 3.2.6). Podrozdział piąty (*Perspectives for further research*) składa się z pięciu krótkich akapitów, w zasadzie punktów, z których niektóre są kontrowersyjne (nieuprawnione), a niektóre oczywiste.

Podsumowując wstępną ocenę tego rozdziału recenzent sugerowałby rozważenie wprowadzenia w nim daleko idących zmian. Podrozdziały pierwszy, czwarty i piąty powinny zostać usunięte, a podrozdziały drugi i trzeci połączone w jedno podsumowanie, składające się z (jak się wydaje) od pięciu do np. dziewięciu punktów lub akapitów, w których podsumowano by najważniejsze wnioski lub przyczynki naukowe wynikające z poczynionych spostrzeżeń i przeprowadzonych analiz. W powyższych punktach powinny znaleźć miejsce najistotniejsze fragmenty usuniętych podrozdziałów.

Rozdział szósty, zatytułowany *Uwagi praktyczne na temat badań eksperymentalnych (Practical notes on experimental research)* zajmuje niecałe dwie strony i składa się z pięciu punktów. Rozdział ten również wydaje się niepotrzebny. Zawarte w nim ważne spostrzeżenia (np. pkt 2b) powinny się znaleźć w zasadniczym tekście pracy, a może nawet, również we wnioskach końcowych. Większość poczynionych uwag sprawia jednak wrażenie niezbyt istotnych, kontrowersyjnych lub oczywistych.



3. Uwagi do rozprawy

3.1. Uwagi krytyczne

- 3.1.1. W programie przeprowadzonych badań brakuje eksperymentalnego sprawdzenia, jaka była wilgotność (tzn. procentowa, wagowa zawartość wolnej wody w betonie) betonu badanych płyt bezpośrednio przed rozpoczęciem ich ogrzewania w piecu gazowym.

Na podstawie opisu przedstawionego przez Autorkę w drugim rozdziale rozprawy (*Studia literatury*) można odnieść wrażenie, że występowanie naprężeń ściskających w betonie ogrzewanym do temperatury pożarowej jest zdecydowanie wiodącym, w zasadzie jedynym, czynnikiem mającym wpływ na podatność betonu na wystąpienie zjawiska odpryskiwania termicznego. Wiadomo jednak, że wpływ zawartości wilgoci w betonie, szczególnie wtedy, kiedy wartość tego parametru przekracza 3%, jest czynnikiem przynajmniej prawie równorzędnym. W tekście rozprawy brakuje uwypuklenia tego problemu. Autorka zwraca na niego uwagę dopiero na 8. str. studiów literatury.

W tekście rozprawy, w zasadzie między wierszami, podano, że badania w piecu przeprowadzono po upływie 300-330 dni od zabetonowania elementów (str. 87.). Pozwala to wnioskować, że prawdopodobnie zawartość wilgoci w betonie badanych płyt wynosiła około 3% (tzn., np. zawierała się w przedziale od 2.7 do 3.3%). Biorąc jednak pod uwagę, że program badań wstępnych był bardzo obszerny i nie wszystkie wyniki tych badań zostały w pełni wykorzystane do analiz wyników badań zasadniczych, brak eksperymentalnego określenia wilgotności badanego betonu budzi duży niedosyt.

- 3.1.2. Biorąc pod uwagę, że zgodnie z poczynionym ustaleniami, Autorka przewiduje dokonanie korekty tekstu rozprawy przed jej ostatecznym wydaniem, recenzent sugeruje rozważenie wprowadzenia do tekstu istotnych zmian, w zakresie rozdziałów od 3. do 8.

Niefortunne jest umieszczenie załącznika jako rozdziału nr 8. Wydaje się, że załącznik, tym bardziej, że w zasadzie, bez komentarzy podano w nim jedynie „suche” wyniki badań, powinien być po prostu załącznikiem umieszczonym na końcu tekstu poza numeracją.

W analizie wyników badań (rozdz. 4.2) zdecydowanie brakuje szerszego (tzn. bardziej przejrzystego) przedstawienia „przechodzenia” od wyników podanych w załączniku do formułowanych generalnych spostrzeżeń lub wniosków. Brakuje też szerszego porównania wyników poszczególnych prób. Warto byłoby np., aby tabele podane na początku poszczególnych rozdziałów załącznika były zestawione blisko siebie. W zasadniczym tekście pracy, np. w jednej dużej tabeli warto byłoby podać najistotniejsze wyniki uzyskane z poszczególnych powtórzeń oraz może również

wartości średnie. Zajęłoby to przecież najwyżej dwie strony. Niefortunne są też ogólne odwołania (podane w rozdz. 4.2) do załącznika liczącego aż 85 stron. Odwołania powinny być „kierowane” precyzyjnie do wskazanych miejsc załącznika.

W wielu miejscach opisy elementów, procedur badawczych oraz wyników są „przemieszane” (por. pkt 2. recenzji), a zawartość poszczególnych podrozdziałów nie w pełni odpowiada ich tytułom. Warto byłoby rozważyć wprowadzenie takich zmian, aby w kolejnych rozdziałach, najpierw był podany opis elementów, wraz z ich przeznaczeniem badawczym, następnie – opis zastosowanych procedur i pomiarów, następnie zestawione najważniejsze wyniki badań (tzn. odpowiednie zestawienie najważniejszych informacji wybranych z załącznika), a dopiero potem analiza wyników, spostrzeżenia i wnioski.

Ponadto wydaje się, że w zasadniczym tekście rozprawy zbyt dużo miejsca poświęcono prezentacji wyników badań wstępnych, tym bardziej, iż odnosi się wrażenie, że badania wstępne były zbyt obszerne w stosunku do tego, jak później wykorzystano ich wyniki. Lepszym rozwiązaniem byłoby przeniesienie, przynajmniej dużej części wyników badań wstępnych (głównie tych opisanych w podrozdziałach 3.1.1 i 4.1) do załącznika, a w zamian za to umieszczenie w zasadniczym tekście pracy spójnego zestawienia najważniejszych wyników badań zasadniczych.

- 3.1.3. Tezy sformułowane w rozprawie są zbyt ogólne, wydają się być postawione „na siłę”, a po głębszym przeanalizowaniu nawet oczywiste. Wątpliwości może też budzić niezbyt mocne powiązanie podsumowania pracy z analizami przedstawionymi w rozdziale 4.2. oraz postawionymi tezami. Warto byłoby zatem rozważyć, czy w ostatecznej, przewidzianej do druku, wersji rozprawy, tezy nie powinny być zastąpione jasno i jednoznacznie sformułowanym celem, a rozdział podsumowujący (nr 5) istotnie zmieniony (np. według uwag podanych w podsumowaniu wstępnej oceny tego rozdziału w punkcie 2. recenzji).
- 3.1.4. Wydaje się, że wnioskowanie ilościowe Autorki, sformułowane w podsumowaniu rozprawy (pkt 4. str. 145), jest nie do końca uprawione lub przynajmniej dyskusyjne.

Trudno się zgodzić ze stwierdzeniem, że w celu osiągnięcia skrępowania ogrzewanego betonu, wystarczającego do zintensyfikowania zjawiska odpryskiwania, stosunek obszaru nienarażonego na działanie wysokiej temperatury do obszaru ogrzewanego, jest wystarczająco duży, jeżeli wynosi jedynie 70%. Wydaje się, że w prowadzonych analizach nieco przeceniono możliwości krępowania ogrzewanej części elementu przez tzw. „zimną obręcz” betonową. Może warto byłoby przeanalizować warunki równowagi sił w przekroju elementu z „rozpychającą się” częścią ogrzewaną i „starającą się ją utrzymać” częścią

nieogrzewaną. Na przykład, w dużym uproszczeniu, przy naprężeniach rozciągających występujących w pasie o szerokości 20 cm, wynoszących 3 MPa, można „uzyskać” naprężenia ściskające część krępowaną o szerokości 30 cm, wynoszące w przybliżeniu 2 MPa. Wyjaśnienia wymaga też, na jakiej podstawie podsumowano, że w przypadku elementu z „zimną obręczą” o szerokości 20 cm, otrzymano wartość omawianego stosunku wynoszącą 180%.

Ponadto w prowadzonych analizach niewystarczająco mocno wyeksponowano, że:

- w rzeczywistości podział na część ogrzewaną i nieogrzewaną jest jedynie umowny; przecież ciepło może „wydostawać” się z komory pieca również przez boczne powierzchnie elementu (*cold rim* wynosił 10 lub 20 cm, a grubość płyty – 15 cm); warto było pomierzyć temperaturę panującą na (lub w pobliżu) bocznej powierzchni płyt, a następnie przeanalizować (tzn. np. obliczyć), jakie było pole temperatury w rejonie znajdującym się nad pionową ścianą komory pieca,
- w krępowaniu dolnej strefy elementu, narażonej na działanie wysokiej temperatury bierze również udział jego górna część, o nie tak wysokiej temperaturze jak część dolna,
- ogrzewanie dolnej części elementu za pomocą jednego palnika gazowego, najprawdopodobniej powoduje, że środkowa część elementu (nad palnikiem) jest ogrzewana znacznie bardziej intensywnie, niż obszar usytuowany bliżej ścian komory pieca.

3.2. Uwagi dyskusyjne

- 3.2.1. Rysunek 2.32 budzi wątpliwości. Przecież kształt, a w szczególności „położenie” dwóch dolnych wykresów podanych na tym rysunku istotnie zależą od naprężenia ściskającego występującego w betonie. Na rysunku nie podano jednak, przy jakim naprężeniu otrzymano przedstawione wykresy.
- 3.2.2. Czy omawiając problem odkształcania się betonu ogrzewanego pod działaniem obciążenia (rys. 2.36, str. 59), nie byłoby warto odnieść się również do prac G.A. Khoury?
- 3.2.3. W opisie aktualnego stanu wiedzy (rozdz. 2.) na temat odpryskiwania termicznego betonu warto byłoby, przynajmniej skrótowo, odnieść się do przynajmniej wybranych prac polskiego badacza – D. Gawina.
- 3.2.4. Czy na pewno ramę służącą do obciążania badanych elementów (por. str. 90 pracy) zaprojektowano na bazie wymagań normy EC3-1-1? W normie tej są podane wymagania na temat projektowania budynków o konstrukcji stalowej. Według doświadczeń recenzenta projektowanie elementów stalowych stanowisk

badawczych „na spełnienie” normowych warunków SGN i SGU może być przyczyną zbyt dużych deformacji lub nawet uszkodzenia ram. W celu uzyskania odpowiedniej sztywności oraz zagwarantowania bezpieczeństwa podczas badań, stanowiska badawcze powinny być i zazwyczaj są znacznie „przewymiarowane” w stosunku do wymagań normowych. Na rys. 3.27 i 3.29 nie podano żadnych wymiarów, a na rys. 3.28 nie podano, z jakich kształtowników (lub może blach) wykonano elementy ramy. Na podstawie podanych tam szkiców można jednak wnioskować, iż rama została (prawidłowo) „przewymiarowana” w stosunku do wymagań normowych.

- 3.2.5. W opisie i dyskusji wyników badań, pomimo przeprowadzenia obszernej analizy deformacji górnej powierzchni badanych elementów, dokonanej za pomocą metody cyfrowej korelacji obrazu (*Digital Image Correlation; DIC*), brakuje bardzo prostej, ale jednak kluczowej informacji, jaka była maksymalna „strzałka wygięcia” każdej z badanych płyt. Można się spodziewać, że w przypadku elementów badanych bez obciążenia wystąpiło zjawisko znane w literaturze pod nazwą *Thermal bowing* (np. prace G. M. Cooke lub recenzenta i współautorów), w wyniku którego element wygiął się w stronę „do wnętrza pieca”. W przypadku elementów ściskanych podczas ogrzewania, przynajmniej w dolnej części elementów, najprawdopodobniej wystąpiło zjawisko znane w literaturze pod nazwą *Load induced thermal strain* (np. prace Promotorki rozprawy lub G. A. Khoury), którego działanie powoduje efekty przeciwstawne do powodowanych przez zjawisko *Thermal bowing*. W badanych elementach, stosunek długości płyty do wysokości jej przekroju był nieduży, znacznie mniejszy od występującego w elementach spotykanych w praktyce, więc różnice w reakcji płyt badanych pod obciążeniem i bez obciążenia, najprawdopodobniej nie miały kluczowego znaczenia. Warto było jednak zwrócić uwagę na tę reakcję i podać w pracy stosowne informacje.
- 3.2.6. Wydaje, że w pracy zbyt mało uwagi poświęcono problemowi wydostawania się pary wodnej przez boczne powierzchnie ogrzewanych płyt (rys. 4.12, str. 115 i podsumowanie w pkt 5.4, str.147). Zjawisko to w badaniach trzeba po prostu wyeliminować lub przynajmniej postarać się ograniczyć do minimum. W przeciwnym przypadku wynik badania będzie zaburzony, a badany element nie będzie odwzorowywał fragmentu płyty lub ściany.
- 3.2.7. W podsumowaniu rozprawy Autorka, jako najbardziej adekwatny do badania betonu z uwagi na podatność na występowanie zjawiska odpryskiwania termicznego, zaleca test z tzw. „zimną obręczą”, ze stosunkiem części nieogrzewanej do ogrzewanej wynoszącym 80% (rozdz. 5.3, poz. VI, str. 147), a w zaleceniach praktycznych (rozdz. 6., poz. 3, str. 149), niezależnie od rozmiarów „zimnej obręczy” uznaje taki test za najprostszy i pozwalający zniwelować różnice,

jakie mogłyby wystąpić między badaniami przeprowadzonymi w różnych laboratoriach. Recenzent nie podziela optymizmu Autorki.

Należy bowiem zauważyć, że jak już wskazywano wyżej (np. pkt 3.1.4 recenzji), „zimna obręcz” z betonu niezbrojonego jest „zbyt słaba”, aby skutecznie skrzepować rozszerzanie się środkowej, ogrzewanej części elementu. Takie skrzepowanie nie będzie odwzorowywało zatem warunków, w jakich znajduje się ogrzewany lokalnie fragment ściany lub płyty żelbetowej podczas pożaru. Należy też zauważyć, że w zaproponowanej wersji eksperymentu skuteczność skrzepowania jest uzależniona od rzeczywistej wytrzymałości betonu na rozciąganie, a cecha ta charakteryzuje się dużym rozrzutem i jest trudna do zbadania eksperymentalnego. Jak sama Autorka stwierdziła, kluczowym parametrem mającym wpływ na podatność betonu na wystąpienie odpryskiwania termicznego są naprężenia ściskające występujące w rejonie ogrzewanym, równoległe do ogrzewanej powierzchni. W omawianym teście, wartość tych naprężeń będzie się istotnie zmieniać w zależności od (przypadkowego przecież) pęknięcia „zimnej obręczy”

Recenzent sugeruje zatem rozważenie nieco innego sposobu badania elementów. Powinny mieć one „zimną obręcz” betonową tak jak zaproponowała Autorka, ale wokół tej „obróczy” można by zastosować dodatkowe, bardzo sztywne skrzepowanie. Można by je uzyskać za pomocą, np. sztywnej ramy lub kratownicy stalowej, skręcanej (np. śrubami) wokół brzegów badanego elementu. Rama nie musiałaby być dodatkowo obciążana, ale powinna być wystarczająco sztywna, aby uniemożliwić (a w praktyce zminimalizować) wydłużanie się badanego elementu. Dopiero w ten sposób można by skutecznie odwzorować usztywnienie ogrzewanej części rzeczywistej ściany lub płyty częścią nieogrzewaną o wymiarach znacznie większych od „zimnej obręczy”. Dodatkowo, dzięki zastosowaniu zaproponowanej ramy można by zminimalizować wydostawanie się pary wodnej przez boczne powierzchnie elementu, a na elementach ramy zamontować układ czujników umożliwiających pomierzenie sił, jakimi będzie ściskany badany element w wyniku skrzepowania deformacji jego brzegów przez ramę oraz pomierzyć wartości tych deformacji.

3.3. Uwagi mniej istotne i szczegółowe

- 3.3.1. W tekście rozprawy jest mowa o rozdziale 9. zatytułowanym *Streszczenie i zakres pracy*, podczas gdy ani w spisie treści, ani w tekście opisany fragment nie ma przypisanego numeru.
- 3.3.2. W rozprawie brakuje informacji, że K. Krzemień i Autorka to ta sama osoba. Warto, aby np. w przypisach na str. 13, gdzie po raz pierwszy występuje cytowanie pracy K. Krzemień, podać stosowne wyjaśnienie.

- 3.3.3. Niektóre rysunki lub tabele (np. rys. 2.7, 2.8, 2.36; tab. 2.1) są „niewyraźne”, najprawdopodobniej skanowane z prac źródłowych. Warto byłoby, aby Autorka opracowała własne rysunki lub tabele na podstawie oryginałów.
- 3.3.4. Niektóre rysunki (np. 2.19, 2.22, 2.23) mają charakter zbyt poglądowy. Warto byłoby dodać na nich przynajmniej dwie lub trzy linie wymiarowe.
- 3.3.5. Nie jest jasny opis do rysunku 2.28, str.53. Dlaczego występuje beton B40 ($f_{c28} = 37$ MPa)? W ogóle, dlaczego „B”? Dlaczego na osi poziomej po dwa razy występuje wartość 10 i 15 MPa?
- 3.3.6. W tekście naukowym nie powinno się podawać nazwy firmy, która wykonała sprzęt do badań (str. 90. rozprawy). Jeżeli Autorka chciała w ten sposób podziękować firmie lub ma z nią ustalenia, że np. nazwa firmy będzie wymieniana, należało to uczynić poza zasadniczym tekstem rozprawy.
- 3.3.7. W podrozdziale 4.1.3, przy rys. 4.3 i tab. 4.3 (str. 104) brakuje informacji (np. wzoru), jak obliczono naprężenie rozciągające, przy którym wystąpiło rozłupanie próbki.
- 3.3.8. Warto, aby Autorka zwróciła uwagę na poprawność opisów. Na przykład w pkt 8.6, w tabeli na str. 219 występuje obciążenie (*load*), a wartość jest podana w jednostkach naprężenia (MPa).
- 3.3.9. W podpisie do rysunków 4.28 i 4.29 str. 130 brakuje wyjaśnienia, czego dotyczą poszczególne ich części: a), b) i c)

4. Merytoryczna ocena rozprawy

Pomimo dość „mocnych” uwag krytycznych sformułowanych w punkcie 3.1 recenzji oraz innych uwag podanych w punktach 2. i 3.2, recenzent stwierdza jednoznacznie, że omawiana tu rozprawa jest dobra i zasługuje na pozytywną ocenę.

Autorka zaplanowała i przeprowadziła obszerne, trudne badania eksperymentalne, poprzedzone dobudowaniem do istniejącego pieca układu umożliwiającego obciążanie badanych elementów oraz dostosowaniem i rozwinięciem metody cyfrowej korelacji obrazu, wykorzystywanej wcześniej w Politechnice Krakowskiej. Bardzo cenny jest też opis aktualnego stanu wiedzy przedstawiony przez Autorkę w drugim rozdziale rozprawy. Opis ten recenzent ocenia jako obszerny, ciekawy, wręcz wyczerpujący.

Ambitny cel pracy postawiony przez Autorkę: ... *porównanie intensywności i form odpryskiwania betonu poddanego działaniu pożaru przy zastosowaniu różnych procedur badawczych* ... , został zrealizowany. Uzyskane wyniki badań, przedstawione na ich podstawie spostrzeżenia, analizy i wnioski, w szczególności dotyczące:

- podstawowych informacji o przebiegu odpryskiwania termicznego betonu w elementach skrępowanych w różny sposób (zestawienie w tab. 4.6),
- informacji ilościowych o ubytkach przekroju, spowodowanych odpryskiwaniem w elementach skrępowanych w różny sposób (rys. 4.16 i 4.17),
- zależności między rodzajem występującego odpryskiwania, a częstotliwością towarzyszącego mu sygnału akustycznego (rys. 4.23),
- informacji na temat deformacji (odkształceń) badanych elementów oraz występujących w nich pęknięć lub rys oraz wykorzystania do badania tych zjawisk metody cyfrowej korelacji obrazu,
- propozycji na temat ujednolicenia sposobu badania podatności betonu narażonego na warunki pożarowe na występowanie w nim zjawiska odpryskiwania termicznego,

stanowią cenny, oryginalny wkład naukowy Autorki w rozwój wiedzy na temat odpryskiwania termicznego betonu w elementach rażonych na warunki pożarowe, a tym samym w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria lądowa i transport (dawniej Budownictwo).

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Podsumowując przeprowadzoną ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Mróz, pt. *Assessment of spalling risk in concrete subjected to fire (Ocena ryzyka eksplozyjnego odpryskiwania betonu w pożarze)*, recenzent stwierdza, że Autorka podjęła się wykonania trudnych badań mających na celu rozwiązanie istotnego, oryginalnego problemu naukowego, jasno i jednoznacznie określiła cel pracy i cel ten zrealizowała.

Uzyskane przez Autorkę wyniki badań i sformułowane przez Nią wnioski stanowią oryginalny wkład naukowy Autorki w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria lądowa i transport (dawniej Budownictwo). Ponadto Doktorantka wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Katarzyny Mróz spełnia wymagania Ustawy z dnia 14. marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 z 2003 r., poz. 595, z późn. zmianami) i w związku z tym recenzent wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony tej rozprawy.

27.05.2020r.
