

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisława PLECHAWSKIEGO
pt.: „Wpływ temperatur pożarowych na wybrane parametry
struktury betonów”

Recenzja została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Budownictwa i Architektury z dnia 07.06.2017 r. (umowa o dzieło WB-06/03/2017).

1. Wstęp

Projektowanie, diagnozowanie oraz znajomość pracy i destrukcji konstrukcji budowlanych ma ogromne znaczenie techniczne i ekonomiczne dla gospodarki narodowej.

Dlatego też wraz z rozwojem nowych innowacyjnych materiałów i konstrukcji realizowane są intensywnie prace naukowo-badawcze i wdrożeniowe zarówno w skali krajowej jak i w skali międzynarodowej nad ocenami podstawowych ich właściwości mechanicznych w warunkach pożarowych.

Od szeregu lat ważną rolę w tym zakresie w naszym kraju spełnia Politechnika Lubelska. Prace doświadczonych zespołów Politechniki realizowane często z innymi ośrodkami krajowymi, jak i zagranicznymi wniosły duży wkład do rozwoju innowacyjnych właściwości i konstruowania elementów z betonu. Są to prace o dużym poziomie naukowym jak również inżyniersko-technicznym.

Dobrym przykładem tej działalności jest recenzowana obecnie praca doktorska mgr inż. Stanisława Plechawskiego, przyczyniająca się do postępu wiedzy w zakresie doskonalenia betonowych konstrukcji na warunki pożarowe, wykonana pod kierunkiem prof. S. Fica. W nauce polskiej jest to temat ciągle aktualny, mający duże uznanie w świecie.

2. Ocena merytoryczna pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska obejmuje naukowe opracowanie wpływu właściwości wytrzymałościowych betonu na jego strukturę i niszczenie w warunkach pożarowych.

Opracowanie zawiera 250 stron maszynopisu, w tym 113 rysunków, 56 tablic oraz 194 pozycji bibliograficznych, a także 8 załączników.

W pracy Autor dokonał oceny aktualnego stanu wiedzy w przedmiocie wytrzymałości i niszczenia betonów, postawił cel i tezy, zaproponował i wykonał oryginalne badania, przeprowadził analizy modelowe otrzymanych wyników oraz zaproponował niekonwencjonalne metody określania parametrów niszczenia betonu i jego składników w warunkach pożarowych.

Prace te posłużyły do zrealizowania postawionego celu oraz tez rozprawy.

- Teza rozprawy jest założeniem, że właściwości fizyko-mechaniczne określają stan destrukcji betonu i jego składników pod wpływem temperatur pożarowych.
- Miarą tego wpływu jest współczynnik intensywności naprężeń w obszarze powstawania zniszczeń.

Cel pracy polegał na określeniu zmian krytycznego współczynnika intensywności naprężeń betonu od jego składników w warunkach pożarowych.

Cel ten osiągnięto przez rozwiązanie problemu naukowego nt. optymalnego doboru modeli niszczenia betonu i jego składników w warunkach pożarowych.

Przeprowadzone przez Autora bogate analizy aktualnego stanu wiedzy z ostatnich lat dotyczyły wybranych zagadnień projektowania i badania właściwości mechanicznych betonów w podwyższonych temperaturach.

W pracy zaprezentowano badania i ocenę wybranych parametrów struktury betonu oraz zależności krytycznego współczynnika intensywności naprężeń wg I Modelu pęknięcia od zaawansowania procesów destrukcyjnych w zaczynie, zaprawie i betonie cementowym powstałych wskutek działania temperatur pożarowych.

Opisano ogólną charakterystykę betonu, jako jednego z podstawowych materiałów konstrukcyjnych stosowanych aktualnie w budownictwie oraz różne podejścia badaczy do opisu zagadnień związanych z tym kompozytem.

Na podstawie bogatej literatury polskiej i zagranicznej, Autor przedstawił aktualny stan wiedzy nt. właściwości kompozytów cementowych jak i zagadnień mechaniki pęknięcia oraz jej zastosowania, podając wpływ wysokich temperatur pożarowych na właściwości kompozytów cementowych oraz ich pęknięcie.

W kolejnym rozdziale Autor przedstawił cel badań, wskazując, że destrukcje struktury zależą od właściwości fizyko-mechanicznych zaczynów, zapraw, a ich wielkość może być oceniana za pomocą współczynnika intensywności naprężeń.

Opisał badania oraz podał podstawowe cechy fizyczne badanych materiałów oraz zależności współczynnika intensywności naprężeń od porowatości i badań struktury na poziomie makro. Obejmują one też analizy struktur badanych betonów na podstawie zdjęć wykonanych za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM). Ponadto zamieszczono analizy i wyniki badań odkształceń i dynamicznego modułu sprężystości betonu, zaczynu i zaprawy w zależności od wzrostu temperatury.

Badania własne betonów, zaczynów i zapraw oraz ich przedstawione wyniki w postaci układów tabelarycznych oraz wykresów, pozwoliły na ustalenie wpływu wysokich temperatur, występujących w czasie pożaru, na właściwości fizyko-mechaniczne betonów, zaczynów i zapraw za pomocą współczynnika intensywności naprężeń. Badania te dają pogląd na zachowanie się betonu i jego składników w warunkach pożarowych.

Ponadto określono ubytki masy próbek betonów i zmian ich objętości wskutek działania temperatur pożarowych, wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie, wartości współczynnika intensywności naprężeń i jego zależności od wskaźnika w/c, wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu oraz temperatur pożarowych.

Przedstawiono także badania własne oraz ich wyniki dla zaczynu betonowego i zaprawy w układzie identycznym jak dla betonu.

Pod koniec pracy Autor porównał zależności współczynnika intensywności naprężeń od temperatury betonów, zaczynów i zapraw, zamieszczając odpowiednie wykresy, na których zaprezentowano m.in. różnice spadku współczynnika intensywności naprężeń dla poszczególnych ośrodków.

W ostatnim rozdziale Autor przedstawił wnioski końcowe, a także konieczność określenia kierunku dalszych badań w celu opracowania wytycznych z możliwością ich praktycznych zastosowań uwzględniających mechanikę pęknięcia przy projektowaniu konstrukcji betonowych wymagających odporności ogniowej.

Zrealizowane szerokie oryginalne badania oraz ich wyniki i ich poprawne analizy, pozwoliły Autorowi na udowodnienie postawionych tez w zakresie możliwości stosowania krytycznego współczynnika intensywności naprężeń przy projektowaniu elementów budowlanych z betonów odpornych na temperatury pożarowe.

Do zrealizowania celu pracy Autor samodzielnie zaprogramował i zrealizował szerokie badania dużej ilości ciał próbnych w kilkudziesięciu seriach oraz przeprowadził prawidłowo analizy statystyczne wyników badań z wykorzystaniem nowoczesnych technik numerycznych.

Zrealizowane badania betonów oraz zapraw i zaczynów pozwoliły Autorowi na:

- Ocenę zwiększania się porowatości oraz ilości i rozwartości rys pod wpływem wysokich temperatur pożarowych.
- Wykazanie, że współczynnik intensywności naprężeń może być dobrym wskaźnikiem poziomu destrukcji betonów, zaczynów cementowych i zapraw poddanych wpływom wysokich temperatur przy znanych w/c.
- Ocenę wpływu wytrzymałości betonów, zwłaszcza na rozciąganie w wysokich temperaturach, na współczynniki intensywności naprężeń, zarówno w przypadku betonów jak i zaczynów cementowych oraz zapraw.
- Ocenę wpływu temperatur pożarowych na zmianę współczynnika intensywności naprężeń betonów, zaczynów cementowych i zapraw. Przy wszystkich badanych w/c największą względną odporność na pęknięcie w wysokich temperaturach wykazywały zaprawy cementowe (w zakresie temperatur, w których nie ulegały jemu zniszczeniom).
- Określenie przedziału wysokich temperatur (do 600°C) przy których istnieje wyraźna zależność współczynnika intensywności naprężeń od wskaźnika w/c. Przy większej wartości w/c betonów, zapraw i zaczynów cementowych następują zmniejszenia współczynnika intensywności naprężeń, by w temperaturze 700°C wskaźnik w/c nie miał już wpływu.

- Porównanie zależności K_{IC} i E_{dyn} betonu przy wskaźniku $w/c = 0,4$ prowadzące do konkluzji, że współczynniki intensywności naprężeń K_{IC} zmniejszają się szybciej niż dynamiczne moduły sprężystości betonów E_{dyn} .

Z wniosków pracy wynika, że postawione tezy, iż określając wielkość współczynnika intensywności naprężeń można ocenić zmiany destrukcyjne powstałe w betonach, zaczynach i zaprawach zarówno przed jak i po pożarze zostały w pełni potwierdzone.

Wiedza uzyskana w trakcie badań wykonanych przez Autora w ramach recenzowanej pracy może być przydatna do oceny struktury, właściwości fizyczno-mechanicznych i stanu elementów konstrukcji betonowych po pożarze, a także może być pomocna do opracowania wytycznych projektowania elementów betonowych uwzględniając mechanikę ich pęknięcia w temperaturach ogniowych. Temu mogą służyć, wyniki badań opisanych zawarte w niniejszej rozprawie oraz ściśle zależności, wzrostu temperatury i współczynnika intensywności naprężeń przy zmiennych wytrzymałościach betonów na ściskanie oraz na rozciąganie.

Stwierdzam, iż program i zakres badań były zrealizowane poprawnie na dobrym poziomie technicznym, zarówno w skali krajowej jak i światowej. Wyniki badań były analizowane w dostatecznym zakresie metodami numerycznymi oraz analitycznymi.

Zaproponowano i zastosowano oryginalne metody badań wytrzymałości modeli oraz oceny zgodności uzyskanych wyników przy małej liczbie próbek przy dotychczasowych propozycjach analitycznych.

Ponadto porównywano różne warianty badań fizyczno-wytrzymałościowych z metodami analitycznymi dla betonów, zaczynów i zapraw w różnych temperaturach pożarowych.

Wyniki powyższych badań materiałów i elementów oraz ich analiz, Autor przedstawił w postaci odpowiednich wykresów i nomogramów. Do analiz złożonych i niejednorodnych Autor zastosował nowoczesne metody analiz statystycznych.

Pozwoliło to na uściślenie metod oceny wielu zalecanych propozycji (międzynarodowych) w tym zakresie.

Ustosunkowując się do oceny, zakresu i metod realizacji pracy doktorskiej należy stwierdzić, że Autor po wnikliwej analizie problemów technologicznych badań wytrzymałościowych, zrealizował poprawnie postawione zadania stosując nowoczesne i dokładne narzędzia badawcze, obliczeniowe i analityczne.

Do oryginalnych badań i analiz własnych Autora rozprawy należy zaliczyć:

- zaprojektowanie odpowiednich elementów próbnych betonów, zapraw i zaczynów do badań w temperaturach pożarowych,
- przeprowadzenie unikalnych badań cech fizyko-mechanicznych w warunkach zbliżonych do pracy elementów w konstrukcjach,
- przeprowadzenie unikalnych analiz porównawczych właściwości betonów, zapraw i zaczynów z wykorzystaniem programów numerycznych i parametrów wariantowych otrzymanych w badaniach własnych i obcych,

- zaproponowanie na podstawie analiz własnych wyników oraz badań i zaleceń innych zależności pomiędzy właściwościami betonów, zaczynów i zapraw z parametrami destrukcji w temperaturach pożarowych.

Przeprowadzone badania, obliczenia i analizy w zakresie diagnostyki i oceny właściwości mechaniczno-fizycznych pozwoliły Autorowi dysertacji na zrealizowanie postawionego celu rozprawy doktorskiej.

Podsumowując ocenę merytoryczną pracy stwierdzam, że Doktorant:

- ◆ dla trafnie dobranego tematu rozprawy doktorskiej postawił naukowy i oryginalny cel pracy oraz w sposób naukowy przedstawił jego realizację,
- ◆ rozwiązał samodzielnie i poprawnie zagadnienie modelowania i badań wytrzymałości oraz cech fizycznych pęknięcia w temperaturach pożarowych z wykorzystaniem nowoczesnych analiz statystycznych,
- ◆ wykorzystał nowoczesne narzędzia badawcze, obliczeniowe i analityczne oraz zastosował naukowe metody obliczeń i analiz numerycznych,
- ◆ wykazał dostateczną wiedzę w zakresie problemów dotyczących projektowania i konstruowania elementów z betonów, zaczynów i zapraw oraz analiz i ocen ich właściwości wytrzymałościowych i fizycznych,
- ◆ wykazał dobrą znajomość właściwości konstrukcji z betonu i wykorzystania metod numerycznych do rozwiązania ich zagadnień wytrzymałościowych

Natomiast, do oryginalnych osiągnięć naukowych pracy doktorskiej należy zaliczyć:

- wnikliwą analizę literatury przedmiotu dot. diagnostyki, wytrzymałości i właściwości fizycznych, obejmującą omawiane zagadnienia w sposób wyczerpujący,
- wykazanie, że zastosowanie nowych wskaźników destrukcji i metod badawczych w określonych warunkach, może być efektywnie stosowane do oceny elementów z dostateczną technicznie efektywnością,
- wykazanie, że możliwe jest stosowanie współczynnika intensywności naprężeń do oceny konstrukcji budowlanych z betonu w warunkach pożarowych.

Przedstawione opracowanie w postaci maszynopisu jest wynikiem wielu prac studialnych, badawczych, analitycznych i technicznych składających się na pracę doktorską.

Styl i język techniczny pracy jest dobry.

Praca jest czytelna, zwięzła i zrozumiała dla czytelnika.

Na pozytywną ocenę zasługuje również fakt, że badania i analizy związane merytorycznie z pracą doktorską Autor rozprawy opublikował częściowo m.in. w recenzowanych artykułach i referatach.

3. Uwagi ogólne i szczegółowe

Celem podniesienia poziomu oraz wartości analiz i obliczeń przedstawiam niektóre ważniejsze uwagi, które proponuję uwzględnić przy dalszych publikacjach i wdrażaniu wyników pracy do praktyki budowlanej. Szczególnie należy:

- ◆ W przyszłych badaniach poszerzyć zakres przeprowadzanych badań i analiz dla innych podobnych rodzajów konstrukcji z betonu dla temperatur pożarowych.

- ◆ Realistycznie oceniać ścisłości korelacyjne zarówno w % jak i podając przedziały błędów korelacyjnych.
- ◆ W wydawnictwach polsko języcznych podawać opisy na rysunkach w j. polskim.
- ◆ Usuwać jawność producentów.
- ◆ Poza tym należy wnieść poprawki merytoryczne i stylistyczne m.in. na str. 10, 108, 171, 182, 196, 202, 204 i 205 (oznaczonych w tekście)

4. Osiągnięcia zawarte w rozprawie

Ocena osiągnięć zawartych w rozprawie:

– określenie zadania (zadań) naukowego, rozwiązanego przez Autora,

Problemem naukowym, który zamierzono rozwiązać w pracy doktorskiej, jest ocena wybranych parametrów ukształtowanej struktury zaczynu, zaprawy i betonu oraz ocena destrukcji powstałych w tych materiałach pod wpływem temperatury pożarowej za pomocą współczynnika intensywności naprężeń. K_{IC} .

Cele oraz nowości naukowe pracy to:

- a) uzyskanie informacji o wpływie wskaźnika w/c na współczynnik intensywności naprężeń i inne właściwości fizyko-mechaniczne badanych materiałów spowodowane działaniem wysokich temperatur pożarowych. W literaturze dotyczącej wpływu temperatur pożarowych na kompozyty cementowe raczej nie spotyka się porównań dla różnych wskaźników w/c, większość badań dotyczyła wytrzymałości, a badania K_{IC} prowadzone były dla betonu o jednym wskaźniku w/c (pkt 2.6). W niniejszej pracy wykonano badania dla trzech wybranych, najczęściej stosowanych w praktyce, w/c = 0,4; 0,5 i 0,6 oraz czterech temperatur - normalnej 20°C i pożarowych: 500, 600 i 700°C. Badania obejmowały nie tylko beton, ale też zaczyn i zaprawę o tak dobranym składzie, aby możliwa była ich porównywalność; skład zaczynów i zapraw był jakby pochodną składu badanych betonów. Tak szerokie spektrum badań daje możliwości wielu porównań zależności parametrów mechaniki pęknięcia (głównie K_{IC}) w odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu, a także porowatości i dynamicznego modułu sprężystości w temperaturach pożarowych.
- b) wpływ temperatur pożarowych na zmiany destrukcyjne w strukturze badanych kompozytów. Badania mikrostruktury (SEM) wykazały, że wzrost wskaźnika w/c oraz wzrost wysokich temperatur działających na kompozyty cementowe wpływa na podwyższenie porowatości i zwiększenie ilości oraz rozmiarów defektów, takich jak rozwartości rys i mikrorys. Uszkodzenia w betonie powstały głównie na granicy ziaren kruszywa grubego i zaczynu.
- c) wykazanie, że współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} może być dobrym wskaźnikiem poziomu destrukcji i zmian strukturalnych betonu poddanego wpływom wysokich temperatur w porównaniu do wytrzymałości na ściskanie, czy dynamicznego modułu sprężystości. Zależności zamieszczone w pracy wskazują jednoznacznie na szybszy spadek współczynnika intensywności naprężeń niż wytrzymałości betonu zarówno na ściskanie jak i rozciąganie, a także na dynamiczny moduł sprężystości.

– **ocena stopnia poprawności rozwiązania,**

W opisie badań własnych przedstawiono m. in. wymiary badanych próbek, skład ich mieszanek oraz opis przyrządów pomiarowych i procedur przebiegu badań. Podano też uzasadnienie wymiarów stosowanych próbek (700x80x150mm), które przyjęto na podstawie zaleceń RILEM (*Determination of fracture parameters (K_{ICs} -CTOD_c) of plain concrete using three-point bend tests.*). Również liczba badanych próbek w poszczególnych testach zgodna jest z wytycznymi RILEM (*Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete.*), które określają, że (tłum.): „Co najmniej trzy identyczne próbki powinny być przetestowane dla każdego rozmiaru próbki”.

– **ocena uzyskanych wyników**

Praca zawiera wyniki badań współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} i jego zależności od wskaźnika w/c, wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu oraz innych parametrów (porowatości, dynamicznego modułu sprężystości) od wzrostu temperatury. Ponadto badano też ubytki masy próbek kompozytów cementowych i zmian ich objętości a także odkształcenia wynikające z działania temperatur pożarowych.

Praktycznie dla wszystkich wyników badań obliczono też odchylenia standardowe i współczynniki zmienności. Obserwuje się wzrost wartości tych parametrów, zwłaszcza współczynnika zmienności, przy podwyższaniu temperatury. Wskaźniki te nie przekraczają jednak wartości określanych w statystyce jako „mała zmienność”, co świadczy o tym, że próbki są reprezentatywne i wyniki badań można uznać za miarodajne.

– **ocena stopnia realizacji celu rozprawy (ewentualnie także wykazania tezy)**

Na podstawie analiz oryginalnych wyników badań własnych Autor pracy sformułował wnioski końcowe, z których wynika, że postawiona na wstępie jedna z tez, iż współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} może być dobrym wskaźnikiem poziomu destrukcji i zmian strukturalnych betonu poddanego wpływom wysokich temperatur została potwierdzona.

Pozostałe tezy, tj: uzyskanie informacji o wpływie wskaźnika w/c na współczynnik intensywności naprężeń oraz wpływ temperatur pożarowych na zmiany destrukcyjne w strukturze badanych kompozytów również zostały potwierdzone badaniami autorskimi.

Bardzo ważnym wnioskiem wynikającym z pracy, w aspekcie jej praktycznej przydatności, to sugestia konieczności określenia kierunków dalszych badań w celu opracowania wytycznych uwzględniających praktyczne zastosowanie mechaniki pęknięcia w projektowaniu konstrukcji betonowych w warunkach pożarowych. Jak wynika z badań Autora spadek współczynnika intensywności naprężeń betonu K_{IC} w temperaturach pożarowych jest wyraźnie większy niż spadek jego wytrzymałości, co predysponuje ten parametr jako wiodący do obliczania konstrukcji betonowych na warunki pożarowe.

Doktorant odnotowuje, że w swojej działalności zawodowej wielokrotnie wykonywał projekty elementów konstrukcji, które musiały spełniać wymogi odporności ogniowej na działanie wysokich temperatur w warunkach pożaru. Aktualne metody projektowania konstrukcji w warunkach pożarowych opierają się na współczynnikach zmniejszających wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie w zależności od wzrostu temperatury (PN-EN 1992-1-2:2008) i nie uwzględniają zasad mechaniki pęknięcia. Działanie to może stać się w dużym stopniu realne, dzięki wynikom badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy doktorskiej.

5. Wnioski końcowe

Recenzowana **rozprawa doktorska** mgr inż. Stanisława Plechawskiego pt.: „*Wpływ temperatur pożarowych na wybrane parametry struktury betonów*” **stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie** zagadnienia naukowego konstrukcji betonowych przez jej Autora.

Do rzeczywistego rozwiązania zagadnienia Autor użył właściwych w stosunku do danego zadania złożonych metod badawczych i analitycznych wytrzymałości i innych cech technicznych oraz uczynił to samodzielnie.

Rozprawa wykazała dobrą ogólną wiedzę Autora w zakresie dyscypliny naukowej, której dotyczy temat rozprawy.

Praca doktorska stanowi dalszy istotny przyczynek do naukowego określania właściwości mechanicznych konstrukcji z betonu, zarówno w projektowaniu jak i w wykonawstwie z uwzględnieniem temperatur pożarowych.

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana **rozprawa spełnia wymagania** stawiane rozprawom doktorskim w **aktualnej Ustawie** o stopniach i tytule naukowym oraz **stawiam wniosek o dopuszczeniu doktoranta do publicznej obrony**.

Obok wartości naukowych i poznawczych praca ma także duże znaczenie dla praktyki budowlanej, zarówno w projektowaniu jak i w wykonawstwie w zakresie konstrukcji budowlanych z betonu w temperaturach pożarowych.

Biorąc pod uwagę zrealizowany szeroki zakres uzyskanych badań i analiz oraz ich przydatność dla budownictwa i gospodarki narodowej uważam, że **praca zasługuje na wyróżnienie**.

Warszawa, dnia 10.08.2017 r.