

Dr hab. inż. Marta Kosior-Kazberuk, prof. PB
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45E
15-351 Białystok

Białystok, 17.05.2021

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
"Skuteczność napraw konstrukcji betonowych prowadzonych w warunkach obniżonej temperatury z zastosowaniem zapraw polimerowo-cementowych"
autorstwa mgr inż. Damiana Wojnowskiego

Recenzję opracowano na podstawie umowy o dzieło Nr GF-1131-0011/2021/UDHO z dnia 20.03.2021.

Rozprawa doktorska została przygotowana w Instytucie Techniki Budowlanej w Warszawie. Promotorem rozprawy był Prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz, a promotorem pomocniczym - Dr inż. Barbara Francke.

1. TEMATYKA ROZPRAWY

Recenzowana dysertacja podejmuje ważne i aktualne zagadnienie trwałości i skuteczności napraw konstrukcji z betonu za pomocą zapraw polimerowo-cementowych. Zainteresowania autora skupiły się na problemie wykonywania napraw w warunkach obniżonej temperatury.

Zaprawy polimerowo-cementowe (PCC) są najczęściej stosowanym, powszechnie dostępnym, oferowanym przez wielu producentów materiałem naprawczym. O trwałości napraw konstrukcji z betonu decyduje wiele czynników, między innymi warunki aplikacji i dojrzewania zaprawy. Zgodnie z kartą techniczną, większość zapraw PCC może być stosowana w temperaturach z zakresu $5\pm 30^{\circ}\text{C}$, a więc również w obniżonej temperaturze. Jednocześnie, zgodnie z zaleceniami normowymi właściwości fizyczne materiału oznacza się w temperaturze $21\pm 2^{\circ}\text{C}$. To powoduje, że nie jest znany wpływ obniżonej temperatury, która może wystąpić w okresie dojrzewania na właściwości zapraw, a tym samym nie można założyć skuteczności naprawy konstrukcji.

Pomimo, że tematyce napraw konstrukcji z betonu poświęcono wiele prac, analizując przyczyny uszkodzeń, dobór metod i materiałów naprawczych, analizując problem kompatybilności komponentów układu naprawianego, to wpływ warunków prowadzenia napraw, a w szczególności zagadnienie realizacji prac w warunkach obniżonej temperatury nie zostało w pełni rozpoznane. Wyjaśnienie tego zagadnienia jest istotne z uwagi na zindywidualizowany charakter każdej naprawy, a także ze względu na między innymi ekonomiczne skutki nieskutecznych napraw.

Postawiony w pracy problem badawczy dotyczy oceny wpływu obniżonej temperatury, występującej w okresie dojrzewania na skuteczność napraw konstrukcji



betonowych, prowadzonych z wykorzystaniem powszechnie dostępnych polimerowo-cementowych zapraw naprawczych.

Autor dokonał tej oceny pośrednio, badając wpływ obniżonej temperatury na zmiany właściwości fizycznych oraz mikrostrukturę reprezentatywnych zapraw PCC.

W powyższym kontekście sformułowano tezę: *"Stosowanie powszechnie dostępnych polimerowo-cementowych zapraw naprawczych w warunkach obniżonej temperatury, mieszczącej się w dolnym zakresie przyjętych zwyczajowo dopuszczalnych granic stosowania, wpływa na ich właściwości, co może obniżyć skuteczność przeprowadzanej naprawy konstrukcji betonowych"*

Biorąc pod uwagę zagadnienie badawcze i tezę, tytuł rozprawy należy uznać za dobrany właściwie. Tematyka rozprawy jest istotna i aktualna, ma zarówno znaczenie poznawcze, jak i odniesienie do praktyki inżynierskiej. Zagadnienie badawcze mieści się w zakresie dyscypliny *inżynieria lądowa i transport*.

2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Rozprawa ma formę maszynopisu, liczy 176 stron. Zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca została podzielona na 12 rozdziałów uzupełnionych Załącznikiem. Podstawową część pracy zilustrowano 63 rysunkami i 25 tabelami. W Załączniku zamieszczono szczegółowe wyniki badań w formie 57 tabel. Pracę kończy bibliografia licząca łącznie 100 pozycji, spośród których około 30% stanowią prace obcojęzyczne, wykorzystano również 15 norm oraz informacje ze stron internetowych. Pozycje bibliograficzne zostały dobrane właściwie.

We *Wstępie* Autor podkreślił konieczność uwzględnienia temperatury, zarówno w trakcie aplikacji zaprawy naprawczej jak i podczas jej dojrzewania, jako jednego z czynników determinujących skuteczność naprawy konstrukcji z betonu. W drugim rozdziale krótko przedstawiono problem badawczy, zakres i tezę pracy.

Obszerny rozdział trzeci zawiera *Przegląd i analizę literatury dotyczącej napraw konstrukcji betonowych oraz wpływu obniżonej temperatury na jej skuteczność*. Autor przybliżył w nim koncepcję naprawy z uwzględnieniem trwałości konstrukcji, scharakteryzował najczęstsze przyczyny uszkodzeń konstrukcji z betonu, opierając się na serii norm PN-EN 1504, przedstawił ogólne zasady i metody napraw, a także omówił rodzaje wyrobów do napraw konstrukcji budowlanych. Opierając się na licznych źródłach literaturowych, szczególnie dokładnie omówił właściwości polimerowo-cementowych zapraw naprawczych oraz modele kształtowania się ich mikrostruktury. Przedstawił również zmiany w podejściu do doboru materiałów naprawczych, w tym zasadę kompatybilności układu.

Autor poświęcił szczególną uwagę analizie wpływu obniżonej temperatury dojrzewania na właściwości wytrzymałościowe kompozytów cementowych, stanowiących bazę dla zapraw naprawczych PCC. Omówienie zasad prowadzenia robót budowlanych, w tym prac naprawczych, w okresie występowania obniżonych temperatur, zakończył komentarzem dotyczącym możliwości stosowania gotowych zapraw PCC w obniżonej temperaturze. Zwrócił uwagę, że karty techniczne tych materiałów nie zawierają zaleceń odnośnie specjalnych metod ich stosowania w niskiej temperaturze.

Godne podkreślenia jest tu nie tylko zacytowanie szeregu prac, ale również ich krytyczna analiza dotycząca wpływu obniżonej temperatury na wyniki badania parametrów

wytrzymałościowych materiałów, uzyskane przez różnych badaczy. Wnioski wynikające z szerokiego przeglądu literatury zostały wykorzystane przy interpretacji wyników badań własnych. Zapoznanie się z bogatą częścią teoretyczną rozprawy pozwala zrozumieć tezę pracy.

W czwartym rozdziale (1 strona) przedstawiono bardzo krótkie podsumowanie przeglądu dostępnych na rynku zapraw naprawczych. Natomiast w rozdziale piątym wyjaśniono sposób doboru materiałów do badań własnych spośród gotowych, dostępnych powszechnie zapraw typu PCC, przeznaczonych do napraw konstrukcyjnych. Do badań wybrano trzy zaprawy przeznaczone do stosowania w zakresie temperatur $5\div 30^{\circ}\text{C}$ oraz jedną - do stosowania w zakresie temperatur $1\div 35^{\circ}\text{C}$. Wybrane do badań zaprawy różniły się zastosowanym kopolimerem, jego zawartością w stosunku do masy cementu, a także zawartością włókien polipropylenowych. Zaprawa M2 zawierała cement CEM I siarczanoodporny. Natomiast w składzie zaprawy M4 znajdował się popiół lotny. Z uwagi na wykorzystanie gotowych zapraw, nie uzyskano pełnej informacji o ich składzie, co ograniczyło możliwości interpretacji wyników badań.

Przygotowując założenia do badań własnych, w rozdziale szóstym przeanalizowano warunki termiczne dla kilku miast zlokalizowanych w różnych regionach Polski, co pozwoliło ustalić warunki prowadzenia badań w obniżonej temperaturze 8°C . Porównawczo, prowadzono badania w temperaturze zgodnej z wymaganiami normowymi ($21\pm 2^{\circ}\text{C}$). W rozdziale siódmym opisano warunki prowadzenia badań symulujące sytuację nieoczekiwanego, krótkotrwałego obniżenia temperatury do poziomu 1°C .

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały poświęcone badaniom eksperymentalnym. W rozdziale ósmym Autor przedstawił koncepcję badań własnych, wyjaśniając dobór analizowanych parametrów zapraw, takich jak wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, przyczepność do podłoża, moduł sprężystości podłużnej, a także skład fazowy, rozkład porów i analiza mikrostruktury za pomocą SEM. W rozdziale dziewiątym opisano metody badawcze. Wyniki badań przedstawiono w rozdziale dziesiątym.

Program badań doświadczalnych, prowadzących do osiągnięcia zamierzonych celów, bazował na oryginalnym planie eksperymentu. W pierwszej kolejności oznaczono wytrzymałość na ściskanie oraz przyczepność do naprawianego podłoża czterech wybranych wcześniej zapraw. Badano zarówno zaprawy dojrzewające w warunkach obniżonej temperatury, jak i porównawczo w temperaturze $21\pm 2^{\circ}\text{C}$. W przypadku wybranych dwóch zapraw, przeprowadzono analizę rozkładu porów metodą porozymetrii rtęciowej, składu fazowego metodą analizy termicznej, a także przeprowadzono analizy obrazów pod mikroskopem w różnym powiększeniu. Dodatkowo, analizowano narastanie wytrzymałości na ściskanie zapraw w warunkach symulowanego nagłego spadku temperatury do 1°C , występującego w różnych okresach dojrzewania. W kolejnym etapie badań rozszerzono analizy o następne cechy fizyczne i warianty badawcze wykorzystując dwie reprezentatywne zaprawy. Wykonano badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w analogicznych warunkach jak w przypadku badania wytrzymałości na ściskanie. Ponadto, oba parametry oznaczono także dla wariantu, w którym po zakończeniu 28-dniowego okresu dojrzewania w obniżonej temperaturze (8°C) oraz zgodnie z warunkami wybranego cyklu zmiennego, zaprawy poddano trzydniowemu wygrzewaniu w temperaturze ($60\pm 2^{\circ}\text{C}$), aby ocenić możliwość dalszego rozwoju wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu.

W rozdziale jedenastym przedstawiono wyniki obliczeń i analiz statystycznych, które pozwoliły na określenie korelacji pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na

rozciąganie przy zginaniu zapraw dojrzewających w zróżnicowanych warunkach termicznych. Analizowano również wpływ zmian temperatury na przyczepność zaprawy do podłoża. Negatywny wpływ obniżenia temperatury na proces kształtowania się mikrostruktury zapraw PCC potwierdzono na podstawie analizy składu fazowego, rozkładu porów, a także analizy obrazów mikroskopowych. Na uznanie zasługują rzetelnie udokumentowane badania eksperymentalne oraz umiejętność posługiwania się statystycznymi metodami analizy wyników i wykorzystywania ich do formułowania wniosków.

Pracę zakończono *Podsumowaniem i wnioskami* sformułowanymi na podstawie analizy wyników badań, dotyczącymi głównie wpływu termicznych warunków dojrzewania na właściwości fizyczne zaprawy determinujące skuteczność wykonanej naprawy.

Przyjęty układ rozprawy i sposób uporządkowania treści jest logiczny i czytelny, właściwy dla prac o charakterze badawczym. Wszystkie części rozprawy są merytorycznie spójne, a tytuły rozdziałów są adekwatne do ich zawartości.

3. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Rozprawę doktorską mgra inż. Damiana Wojnowskiego oceniam pozytywnie. Własne badania eksperymentalne, ukierunkowane na wyjaśnienie wpływu obniżonej temperatury na parametry wytrzymałościowe i mikrostrukturę zapraw naprawczych PCC, zostały zaprogramowane prawidłowo z uwagi na założony cel i sformułowaną tezę. Metodyka badań nie budzi zastrzeżeń. Badania zostały dokładnie opisane i udokumentowane. Uzyskano wartościowe rezultaty, które zostały przedstawione czytelnie w formie graficznej w postaci licznych wykresów i zestawień tabelarycznych.

Autor właściwie dobrał i uzasadnił koncepcję oceny zmian temperatury w różnych fazach dojrzewania na rozwój parametrów zaprawy decydujących o skuteczności naprawy konstrukcji z betonu. W mojej opinii Autor przeprowadził poprawną interpretację i krytyczną analizę uzyskanych wyników, dowodząc umiejętności posługiwania się metodami naukowymi w rozwiązywaniu problemu badawczego. Wnioski, które jednoznacznie wynikają z przeprowadzonych badań, zostały sformułowane prawidłowo. Założenia badawcze zostały zrealizowane, a teza rozprawy udowodniona.

Do znaczących osiągnięć Autora należy zaliczyć, między innymi:

1. Opracowanie i zrealizowanie interesującego programu badań, w efekcie którego uzyskano szereg wartościowych wyników, które mogą przyczynić się do zwiększenia trwałości napraw konstrukcji z betonu przy zastosowaniu zapraw polimerowo-cementowych.
2. Przeprowadzenie badań i analiz ukierunkowanych na szczegółowe wyjaśnienie wpływu obniżenia temperatury w różnych fazach dojrzewania zaprawy, a następnie jej wygrzewania, na właściwości decydujące o skuteczności prac naprawczych. Wsparcie przeprowadzonych analiz przy wykorzystaniu badań mikrostruktury.
3. Ustalenie korelacji pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu zapraw dojrzewających w zróżnicowanych warunkach termicznych.

Z uwagi na ciągłe poszukiwanie trwałych i efektywnych metod naprawy konstrukcji rozprawa ma obok poznawczego, również charakter aplikacyjny.

4. UWAGI DOTYCZĄCE PRACY

Uwagi dyskusyjne

1. Praca miejscami nie ma w pełni przejrzystego układu. Treści, będące przeglądem literatury umieszczono w rozdziałach dotyczących badań własnych. Wyjaśnienia dotyczące założeń i metodyki badań nie powinny być podane w podrozdziałach prezentujących wyniki.
2. W pracy nie podano, jakie były oczekiwane parametry fizyczne gotowych zapraw, gwarantowane przez producentów.
3. Opisując wyniki badań, należało zaznaczyć, czym różniły się między sobą zaprawy M1, M2, M3 i M4, co pozwoliłoby pełniej ocenić i zrozumieć wpływ temperatury na analizowane właściwości fizyczne.
4. Proszę o wyjaśnienie stwierdzenia: "*Obserwowane zjawiska wskazują, że obniżenie temperatury podczas dojrzewania badanych zapraw PCC nie zapewnia uzyskania oczekiwanego upakowania ich mikrostruktury*" (str. 82).
5. W opisie wyników badania składu fazowego metodą analizy termicznej (10.1.5) nie podano jednoznacznie, której zaprawy dotyczy. Której z zapraw dotyczą wyniki przedstawione na Rys. 34?
6. W treści rozdziału 11.3 brakuje odniesienia do Rys. 62 i Rys. 63. Przy sporządzaniu tych rysunków wykorzystano wyniki badań przedstawione w pracy Bobrowicz J.: *Proces wiązania i twardnienia spoiw cementowych w obniżonych temperaturach*, ITB, 2004. Należało wspomnieć o tym w podpisie pod rysunkami.
7. Rozdziały 4 (1,5 strony), 5 (3 strony), 6 (2,5 strony) i 7 (1,5 strony) można było połączyć w jeden zatytułowany np. *Założenia do programu badań*.
8. W podsumowaniu zabrakło praktycznych wskazówek stosowania zapraw PCC w obniżonych temperaturach albo wskazania kierunków dalszych badań, które prowadziłyby do opracowania takich zaleceń.

Uwagi natury formalnej

Rozprawa, napisana poprawną polszczyzną, została zilustrowana dużą liczbą rysunków, zdjęć i tabel. Niestety, części z nich nie przywołano w treści pracy. Pozycje wymienione w spisie literatury zostały zacytowane. Praca została przygotowana dość starannie, mam jednak kilka drobnych uwag natury edycyjnej:

- Usterki edytorskie i gramatyczne dotyczą przede wszystkim tzw. literówek, błędów gramatycznych oraz interpunkcyjnych.
- Część rysunków zaczerpniętych z literatury ma słabą jakość (np. Rys. 1, Rys. 5).
- W odniesieniu do tematu rozprawy, nie jest jasne, w jakim celu zamieszczono Rys. 8 do Rys. 13.
- Szczególnie w części przeglądowej, w tekście brakuje odniesień do wielu zamieszczonych rysunków. Określenia "na rysunku powyżej", "na rysunku poniżej" nie są jednoznaczne, ponieważ rysunki znajdują się często na innych stronach niż odnoszący się do nich opis.
- W treści pracy znalazły się niezręczne sformułowania, takie jak: "...Badanie wytrzymałości na zginanie przeprowadzono w oparciu o tę samą procedurę co

badanie wytrzymałości na ściskanie..." (str. 67), "...zaprawa dojrzewająca w obniżonej temperaturze nie uzyskała poziomu, jaki osiąga gdy dojrzewa w temperaturze laboratoryjnej..." (str. 72), "...Takie usytuowanie wartości wytrzymałości na zginanie na koniec okresu dojrzewania..." (str. 94), itp.

- Krzywe na Rys. 44 i Rys. 45 częściowo pokrywają się, co znacząco utrudnia ich interpretację.
- Podpis dotyczący Rys. 42 powinien znajdować się bezpośrednio pod nim.
- Dlaczego pojedyncze obniżenie temperatury w trakcie 28 dni dojrzewania nazywano cyklem?
- Tabele i rysunki w pracy zawierają te same dane. Zwykle stosuje się jedną formę prezentacji wyników badań.

Wymienione przeze mnie uwagi nie umniejszają oryginalności i wartości merytorycznej prezentowanej pracy.

5. WNIOSEK KOŃCOWY

Opiniowana rozprawa doktorska mgra inż. Damiana Wojnowskiego stanowi oryginalne rozwiązanie zadania naukowego polegającego na ustaleniu wpływu obniżonej temperatury w okresie dojrzewania na parametry wytrzymałościowe polimerowo-cementowych zapraw naprawczych, które mają wpływ na skuteczność naprawy konstrukcji betonowych. Przeprowadzone badania eksperymentalne i analizy posłużyły do opisanego zależności parametrów wytrzymałościowych zapraw, dojrzewających w warunkach obniżonej temperatury oraz w warunkach zgodnych z wymaganiami normowymi, od czasu dojrzewania.

Sformułowane w rozprawie cele zostały moim zdaniem osiągnięte, a teza udowodniona. Autor rozprawy wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem pracy, umiejętnościami programowania i prowadzenia badań, w tym wykorzystania metod badań doświadczalnych i statystycznej analizy wyników. Zrealizował obszerny zakres badań, uzyskał oryginalne i wartościowe rezultaty, przeanalizował je i krytycznie ocenił oraz zakończył poprawnymi wnioskami.

Opiniowana praca spełnia w stopniu wystarczającym wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595). W mojej opinii rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie naukowej *inżynieria lądowa i transport* w zakresie stosowania zapraw PCC służących do naprawy konstrukcji z betonu w zróżnicowanych warunkach termicznych.

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Damiana Wojnowskiego do publicznej obrony rozprawy.

A. Jonin-Łobaczewski