

**Autor rozprawy doktorskiej:** mgr inż. Damian Wojnowski

**Promotor:** prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

**Promotor pomocniczy:** dr inż. Barbara Francke

**Skuteczność napraw konstrukcji betonowych prowadzonych w warunkach obniżonej temperatury z zastosowaniem zapraw polimerowo-cementowych**

**STRESZCZENIE**

Potrzeba czy konieczność prowadzenia robót budowlanych na przestrzeni całego roku powoduje, iż widok intensywnych prac na placu budowy przy niskich temperaturach nie jest zaskoczeniem. Takie działania wymuszone są m.in. długotrwałymi procesami budowlanymi coraz bardziej skomplikowanych konstrukcji i oczekiwaniami inwestorów do jak najszybszego zakończenia budowy. Ponadto mogą być także związane z przesunięciami w harmonogramach prac, przy jednoczesnym zobowiązaniu wykonawców do terminowego zakończenia robót, którego niedotrzymanie może skutkować wysokimi karami finansowymi. Jako jeden z rodzajów robót budowlanych można wymienić roboty naprawcze. W ich przypadku, jako czynnik powodujący konieczność ich prowadzenia można także wymienić potrzebę natychmiastowego usunięcia występujących uszkodzeń, ze względu na ryzyko dalszego rozwoju wykrytej wady. Co w konsekwencji, przy braku podjęcia działań, może doprowadzić do utraty możliwości wykorzystywania obiektu zgodnie z przeznaczeniem, a w skrajnych przypadkach do katastrofy budowlanej.

Do napraw konstrukcji budowlanych wykorzystywane są m.in. polimerowo-cementowe zaprawy naprawcze, które są najczęściej stosowanym typem tego rodzaju materiałów do napraw. Mają one licznych reprezentantów wśród materiałów budowlanych powszechnie dostępnych i oferowanych przez wielu producentów. Zdecydowana ich większość może być stosowana w temperaturach z zakresu 5-30°C, przy jednoczesnym oznaczaniu parametrów w temperaturze laboratoryjnej, a więc w 21°C. To sprawia, że nie jest znany wpływ obniżonej temperatury występującej w okresie dojrzewania na właściwości zapraw, a mimo to zwyczajowo dopuszczone jest ich stosowanie w warunkach temperaturowych znacznie odbiegających od laboratoryjnych.

W pracy postawiono sobie problem badawczy, polegający na ocenie wpływu obniżonej temperatury występującej w okresie dojrzewania na skuteczność napraw konstrukcji betonowych prowadzonych z wykorzystaniem powszechnie dostępnych polimerowo-cementowych zapraw naprawczych.

Przedstawiono zagadnienia związane ze strategią napraw z uwzględnieniem trwałości konstrukcji betonowych, opisano uszkodzenia oraz przyczyny ich powstawania, zasady i metody naprawy, a także scharakteryzowano rodzaje wyrobów do napraw konstrukcji budowlanych, ze szczególnym uwzględnieniem polimerowo-cementowych zapraw naprawczych. Przybliżono także podstawowe procesy i modele kształtowania się mikrostruktury zapraw PCC oraz opisano kwestię skuteczności naprawy i problematykę kompatybilności układu materiałów naprawczy – podłoże betonowe. W pracy omówiono również zasady prowadzenia robót w warunkach obniżonej temperatury dla betonu, a także przeanalizowano jej wpływ na parametry wytrzymałościowe materiałów cementowych. Zostały także przedstawione przykłady stosowania zapraw w okresie występowania obniżonej temperatury, a także przykłady badań laboratoryjnych, w których uwzględniano wpływ niskich temperatur.

W pracy zaplanowano eksperyment badawczy, w którym zastosowane polimerowo-cementowe zaprawy naprawcze wytypowano w oparciu o przeprowadzoną analizę dostępnych powszechnie, gotowych do zastosowania materiałów. Badania przeprowadzono na czterech wyrobach pochodzących od trzech różnych producentów. Warunki dojrzewania przyjęto w oparciu o analizę danych temperaturowych dla wybranych miast Polski. Badania wykonano dla zapraw dojrzewających zarówno w temperaturze obniżonej, jak i porównawczo laboratoryjnej. Dodatkowo wybrane właściwości oznaczono na zaprawach dojrzewających zgodnie z zaprojektowanymi przez autora, zmiennymi cyklami temperaturowymi, symulującymi nagłe, nieoczekiwane obniżenie temperatury w różnych momentach dojrzewania. W celu oceny potencjału zapraw do dalszego rozwoju wytrzymałości, dla wybranych wariantów badawczych zaprawy poddano także trzydniowemu wygrzewaniu w temperaturze 60°C, po zakończeniu 28-dniowego okresu dojrzewania w temperaturze obniżonej oraz zgodnie z warunkami wybranego zmiennego cyklu temperaturowego. W ramach zaplanowanego eksperymentu wykonano badania wytrzymałości na ściskanie i zginanie, modułu sprężystości przy ściskaniu, przyczepności, składu fazowego metodą analizy termicznej, rozkładu porów metodą porozymetrii rtęciowej, a także przeprowadzono analizy obrazów pod mikroskopem przy różnym powiększeniu.

Otrzymane wyniki badań, a także przeprowadzone analizy, obejmujące również opracowania statystyczne wskazały, iż prowadzenie prac w okresie występowania obniżonej temperatury może istotnie wpłynąć na osiągnięty poziom ich właściwości. Obniżona temperatura wpływa na spadek tempa wzrostu wytrzymałości na ściskanie i zginanie, a co za tym idzie na niższy poziom uzyskiwanych wartości po danym okresie dojrzewania. Jego wydłużenie powoduje wzrost wartości wytrzymałości na ściskanie, jednak jedynie w nielicznych przypadkach uzyskiwany jest poziom wytrzymałości jak przy dojrzewaniu przez 28 dni w warunkach laboratoryjnych. Dodatkowy spadek

temperatury występujący w okresie dojrzewania może pogłębić negatywny wpływ obniżonej temperatury na wytrzymałość zapraw naprawczych. Poddanie ich zaś wygrzewaniu po zakończonym okresie dojrzewania w niskich temperaturach powoduje pozytywne efekty w postaci wzrostu wartości wytrzymałości, co świadczy o potencjale zapraw do dalszego rozwoju wytrzymałości. Obniżona temperatura występująca w okresie dojrzewania wpływa również na spadek wartości przyczepności w układach materiał naprawczy – podłoże betonowe, a w konsekwencji na obniżenie tolerancji błędów kompatybilności przy doborze materiału, co z pewnością może obniżyć skuteczność wykonanej naprawy. Powoduje ona również, iż zaprawa w różnych okresach dojrzewania wykazuje mniejszy stopień hydratacji, a jej porowatość całkowita jest większa w porównaniu z przypadkiem dojrzewania w temperaturze 21°C. Obserwowane w powyższych badaniach zjawiska pokrywają się także z niewielkimi różnicami otrzymanymi na obrazach mikroskopowych. Przeprowadzone analizy wyników badań wskazały, iż pomiędzy wartościami wytrzymałości na zginanie i ściskanie występuje prawie pełna lub bardzo wysoka korelacja, a wyznaczona współzależność pomiędzy powyższymi właściwościami kształtuje się na poziomie 0,14-0,19. Wykonane analizy wskazały także, iż w pierwszym dniu dojrzewania wartość wytrzymałości na ściskanie uzyskana przy dojrzewaniu w obniżonej temperaturze stanowi zaledwie 20% tej otrzymanej w 21°C, a w kolejnych dniach wartość ta się stopniowo zwiększa, nie osiągając jednak w żadnym z przypadków 100%. Przeprowadzone badania i analizy potwierdziły postawioną w pracy tezę mówiącą o tym, iż 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 przeprowadzonej naprawy konstrukcji betonowych.

#### ***Słowa kluczowe***

polimerowo-cementowa zapraw naprawcza, naprawa konstrukcji betonowych, skuteczność naprawy, obniżona temperatura, kompatybilność

# Efficacy of concrete structure repairs carried out in lowered temperature conditions using polymer-cement mortars

## SUMMARY

The need or necessity to carry out building works all year round makes the view of intensive works on a building site not surprising. Such activities are forced, e.g. by long-lasting building processes of gradually more complex structures and the investors' expectations that the construction should be completed as quickly as possible. Moreover, they can be related to some modifications in the work schedule, with the contractors' being simultaneously obliged to complete the works within the deadline, whose not fulfilling may result in high economic penalties. Repair works can be mentioned as a type of building works. Another factor that entails the need to perform such works involves urgent repair of failures because of the risk of a *hidden defect further development*. Consequently, if no actions are taken, there may be no possibility to use the building as intended, or a construction disaster may occur in extreme cases.

Polymer-cement repair mortars, which are the most common type of materials used for repairs, are employed for building structure repairs. They are abundantly represented among the common building materials offered by many manufacturers. Most of the mortars can be used in temperature ranges between 5 and 30°C, at a simultaneous identification of the parameters at a laboratory temperature, i.e. at 21°C. That is why the influence of lowered temperature in the curing period on the mortar properties is unknown, but the mortars are habitually used in temperature conditions deviating significantly from those occurring in a laboratory.

The research subject the paper focuses on assessing the influence of lowered temperature occurring in the curing period on the efficacy of concrete structure repairs carried out with the common polymer-cement repair mortars.

Issues related to the repair strategy, including the durability of concrete structures' durability, are presented, damage and its causes described, along with the principles and methods of repair, and the types of products for concrete structures repair characterised, with a special focus on polymer-cement repair mortars. Fundamental processes and models of PCC mortars' microstructure formation are presented, and the issue of repair efficacy and compatibility of the repair material - concrete structure system described. The paper also presents the principles of doing works at lowered temperatures for concrete and the low temperature's influence on the analysed cement materials' strength parameters. Some examples are presented of using mortars in lowered

temperature periods and examples of laboratory tests that considered the influence of low temperatures.

A research experiment was planned in the study, where the applied polymer-cement repair mortars were selected based on an analysis of common, ready-to-use materials. Four products from three manufacturers were tested. The curing conditions were assumed based on an analysis of temperature data for selected cities in Poland. The tests applied to mortars curing at lowered and (for comparison) laboratory temperature. Additionally, selected properties were identified for the curing mortars according to variable temperature cycles - designed by the author - simulating a sudden, unexpected temperature decrease at different moments of curing. In order to evaluate the mortars' potential for further strength development, for selected test variants, the mortars were subjected to heating at 60°C for three days, following a 28 days' curing period at a lowered temperature, and according to the conditions of the selected variable temperature cycle. The performed tests included compressive and flexural strength, modulus of elasticity in compression, adhesion, phase composition with a thermal analysis method, and pore distribution with mercury porosimetry method; the images were analysed under a microscope at different magnifications.

The test results and analyses, which included statistical studies, revealed that doing the works in the lowered temperature periods may significantly affect the achieved characteristics level. Lowered temperature reduces the rate of the compressive and flexural strength increase and consequently contributes to a lower level of the achieved values after the reference curing period. Once the curing period is extended, the compressive strength rises; however, the same level as in curing for 28 days in laboratory conditions is achieved only in a few cases. An additional temperature drop in the curing period may aggravate the lowered temperature's negative influence on the repair mortar's strength. If the mortars are heated after the end of curing at low temperatures, some positive effects are observed, including an increase in the strength value, which is a testimony to the mortar's potential to develop its strength further. Lowered temperatures in the curing period also decrease the adhesion value in the repair material - concrete substrate system. Consequently, it reduces the compatibility error tolerance when choosing the material, which can make the completed repair less efficacious. Furthermore, in different curing periods, the mortar reveals a lower hydration degree, and its total porosity is more significant than for curing at 21°C. The phenomena observed in the abovementioned tests correspond to the subtle differences in the microscopic images. The analysis of the test results revealed that there is a nearly complete or very high correlation between the bending and compressive strength values, and the identified dependence between the properties mentioned above amounts to 0.14-0.19. The analyses also revealed that on the first day of curing, the value of the compressive strength obtained for curing at a

lowered temperature is only 20% of the value obtained at 21°C, while on the following days, the value was gradually increasing, but did not reach 100% in any of the cases. The tests and analyses confirmed the research thesis presented in the paper, stating that the application of common polymer-cement repair mortars in lowered temperature conditions, within the lower range of the habitually admissible application limits, affects the mortars' properties, which may reduce the efficacy of the completed repair of concrete structures.

**Keywords**

polymer-cement repair mortar, repair of concrete structures, repair efficacy, low temperature, compatibility

Dominik Wyporski