

Kompozyt cementowy z częściowym wykorzystaniem naturalnych substytutów i materiałów odpadowych

Promotor: dr hab. inż. Zbigniew Szcześniak, prof. WAT

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Małek

W rozprawie doktorskiej skoncentrowano się na badaniu kompozytów cementowych (KC) zawierających modyfikacje naturalnymi substytutami cementu, to jest zeolitem, metakaolinitem i mikrometakaolinitem oraz włóknami odpadowymi pochodzącymi z recyklingu i wykonanymi z różnych materiałów – polipropylenu, szkła i stali. Głównym celem pracy było zaprojektowanie kompozytu cementowego o podwyższonych właściwościach mechanicznych przy zachowaniu zasad zrównoważonego rozwoju i jednoczesnym połączeniu badanych modyfikacji. W ramach badań przeprowadzono szereg testów eksperymentalnych, które dostarczyły danych niezbędnych do wyboru komponentów finalnego kompozytu oraz oszacowania ich odpowiednich ilości. Zasadniczą ich częścią były badania właściwości mechanicznych, które uwzględniały próby ściskania, rozciągania przy rozłupywaniu czy zginania trójpunktowego. Projektowanie składu kompozytów natomiast obejmował z kolei wykorzystanie tradycyjnej metody trzech równań połączonej ze wspomnianymi wcześniej badaniami eksperymentalnymi, które polegały na modyfikacji składu mieszanek w oparciu o uzyskane wyniki badań laboratoryjnych. Poprzez syntezę wyników uzyskanych z obu metod udało się opracować finalny skład kompozytu cementowego zawierającego w swojej matrycy zarówno włókna odpadowe jak i naturalne substytuty cementu. Analiza literatury tematu wykazała, że istnieje rosnące zainteresowanie poszukiwaniem alternatywnych materiałów, które po wbudowaniu w matrycę kompozytu cementowego podwyższą jego właściwości fizyczne i mechaniczne. Na podstawie przeglądu wyników badań w dostępnych publikacjach, stwierdzono braki dotyczące szerszego potraktowania koncepcji badawczych w ramach wymienionych poszukiwań. Literatura tematu skupia się w większości na zastosowaniu jednego typu zamiennego materiału i przedstawia jego wpływ na właściwości KC. Brakuje zatem kompleksowego opracowania uwzględniającego zespolenie kilku rodzajów materiałów i określenie wpływu tego zespolenia na właściwości uzyskanego kompozytu. W rezultacie, podjęto własne badania według szerszej koncepcji programowej i wykazano, że przyczyniły się one do opracowania nowych rozwiązań w dziedzinie kompozytów cementowych oraz wypełnienia wspomnianej luki badawczej. Badania rozpoczęto od identyfikacji potencjalnych komponentów kompozytu cementowego. W pierwszej kolejności skupiono się na możliwych do zastosowania proszkach, to jest zeolicie, metakaolincie i mikrometakaolincie. Uzyskane wyniki badań mikroskopowych ich struktury, a także składu chemicznego pozwoliły na wyciągnięcie wstępnych wniosków w zakresie możliwości ich zastosowania w matrycy kompozytu. Zostały one potwierdzone w kolejnych badaniach laboratoryjnych kompozytów cementowych z częściowym substytutem cementu. Pozwoliło to wprowadzić je do matrycy finalnego kompozytu i określić ich maksymalną ilość, która zapewnia wzrost parametrów wytrzymałościowych próbek. Szczególny nacisk położono na analizę zmian wartości parametrów mechanicznych w zależności od ilości substytutów oraz określenie dominujących trendów w poszczególnych rodzajach wytrzymałości materiałów. Następnie podjęto próbę przebadania kolejnego typu komponentów, czyli materiałów odpadowych. Do modyfikacji wybrano materiały w formie włókien recyklingowych, takie jak włókna polipropylenowe,

szklane i stalowe. Włókna wyselekcjonowano na podstawie testów ich wytrzymałości na rozciąganie, a także obserwacji ich powierzchni zewnętrznej. Próbkę zawierającą wytypowane przez mnie dodatki wykazały wzrost właściwości mechanicznych. W związku z tym zdecydowano się na rozszerzenie zakresu badań i określenie ilości poszczególnych włókien, która nie powoduje efektu językowania przy jednoczesnym zachowaniu wzrostu parametrów mechanicznych próbek. Dzięki temu zapewniono prawidłowy proces produkcji przyszłych kompozytów betonowych. Wytypowane przez mnie dodatki zatem, jak również ich ilości, są dobrze wyselekcjonowane do pracy nad uzyskaniem kompozytów, które mogą być wykorzystane w budownictwie drogowym lub kubaturowym. Uzyskane wyniki dla badanych modyfikacji obejmowały swoim zakresem badania materiałowe kompozytów zawierających włókna odpadowe i substytuty cementu. Na podstawie testów eksperymentalnych wykazano jak modyfikacje wpływają na właściwości materiałowe kompozytów. Określono, że substytuty cementu nie wpływają na takie cechy jak konsystencja mieszanki, gęstość finalnego kompozytu, ilość porów powietrza w nim zawartą i wartość pH. Z kolei zastosowanie proszków warunkuje wartość modułu sprężystości, która to maleje wraz ze wzrostem ilości zastosowanych substytutów cementu lub ich połączenia. W przypadku włókien odpadowych odnotowano z kolei odwrotną tendencję. Warto zaznaczyć również, że zaproponowane połączenie substytutów cementu jak i jego wpływ na właściwości materiałowe kompozytu betonowego nie był do tej pory poruszany w dostępnej literaturze. Badania w zakresie termicznym przeprowadzono przy użyciu metody impulsowej. Przeanalizowane odpowiedzi temperaturowe na impulsy przepływu ciepła przez dany kompozyt pozwoliły na określenie podstawowych wartości przenikania ciepła, ciepła właściwego i dyfuzyjności cieplnej oraz ich zmian na skutek przeprowadzonych modyfikacji składu poszczególnych materiałów. Wyniki testów wykazały duże zróżnicowanie badanych parametrów w przypadku kompozytu zbrojonego włóknami stalowymi i niezbrojonego. W przypadku przenikania ciepła i ciepła właściwego wartości wzrastały, natomiast dyfuzyjność cieplnej malała, wraz z ilością zastosowanych włókien stalowych. Istotnym elementem niniejszej rozprawy, będącym równocześnie jednym z jej głównych elementów oryginalnych, było połączenie modyfikacji i wykonanie finalnego wyrobu budowlanego z kompozytu – cegły betonowej. Zaprojektowanie jej składu było możliwe dzięki wynikom badań laboratoryjnych poszczególnych modyfikacji. W trakcie testów finalnego wyrobu budowlanego posłużono się metodą cyfrowej korelacji obrazu (ang. digital image correlation DIC), która pozwoliła na określenie rozkładu naprężeń w czasie w badanym materiale. Dzięki temu opisano również sposób jego zniszczenia w próbie ściskania oraz w próbie trójpunktowego zginania. W trakcie testów udało się również określić zależności siła–przemieszczenie w obu wymienionych próbach, które nie były wcześniej publikowane w literaturze krajowej czy zagranicznej. Ponadto, po próbie trójpunktowego zginania przeprowadzono również obserwacje pod mikroskopem zniszczonych cegieł. Zaobserwowano, że zniszczenie następowało w matrycy cementowej bez wcześniejszego wrywania włókien, które były równomiernie rozmieszczone w powstałym po zniszczeniu przelomie próbki. W związku z tym, wyrób budowlany został zaprojektowany w prawidłowy sposób. Uzyskane wyniki potwierdziły, że przedstawione podejście daje możliwość prawidłowego zaprojektowania kompozytu cementowego z naturalnymi substytutami i materiałami odpadowymi, który wykazuje podwyższone właściwości mechaniczne w stosunku do samego kompozytu cementowego przed jego modyfikacją.

Cement composite with partial use of natural substitutes and waste materials

Supervisor: dr hab. inż. Zbigniew Szcześniak, prof. WAT

Auxiliary Supervisor: dr inż. dr inż. Marcin Małek

The doctoral dissertation focused on the study of cement composites (KC) containing modifications with natural cement substitutes, i.e. zeolite, metakaolinite and micrometakaolinite, as well as recycled waste fibers made of various materials - polypropylene, glass and steel. The main goal of the work was to design a cement composite with improved mechanical properties while maintaining the principles of sustainable development and at the same time combining the tested modifications. As part of the research, a number of experimental tests were carried out, which provided data necessary to select the components of the final composite and estimate their appropriate quantities. The main part of them were tests of mechanical properties, which included compression, splitting and three-point bending tests. Designing the composition of composites included the use of the traditional three-equation method combined with the previously mentioned experimental tests, which consisted in modifying the composition of mixtures based on the obtained laboratory test results. By synthesizing the results obtained from both methods, it was possible to develop the final composition of the cement composite containing both waste fibers and natural cement substitutes in its matrix. The analysis of the literature on the subject has shown that there is a growing interest in searching for alternative materials that, when incorporated into a cement composite matrix, will increase its physical and mechanical properties. Based on the review of research results in available publications, deficiencies were found regarding a broader treatment of research concepts within the above-mentioned searches. The literature on the subject mostly focuses on the use of one type of replacement material and presents its impact on the properties of KC. Therefore, there is no comprehensive study taking into account the combination of several types of materials and determining the impact of this combination on the properties of the obtained composite. As a result, own research was undertaken according to a broader program concept and it was demonstrated that it contributed to the development of new solutions in the field of cement composites and filling the mentioned research gap. The research began with the identification of potential cement composite components. First, the focus was on powders that could be used, i.e. zeolite, metakaolinite and micrometakaolinite. The obtained results of microscopic examination of their structure and chemical composition allowed for drawing preliminary conclusions regarding the possibility of their use in the composite matrix. They were confirmed in subsequent laboratory tests of cement composites with a partial cement substitute. This made it possible to introduce them into the matrix of the final composite and determine their maximum number, which ensures an increase in the strength parameters of the samples. Particular emphasis was placed on analyzing changes in the values of mechanical parameters depending on the number of substitutes and determining the dominant trends in individual types of material strength.

Then, an attempt was made to test the next type of components, i.e. waste materials. Materials selected for modification were recycled fibers, such as polypropylene, glass and steel fibers. The fibers were selected based on tests of their tensile strength, as well as observations of their external surface. Samples containing the additives I selected showed an increase in mechanical properties. Therefore, it was decided to expand the scope of the tests and determine the amount of individual fibers that does not cause the bristling effect while maintaining the increase in the mechanical parameters of the samples. This ensured the correct production process of future concrete composites. Therefore, the additives I selected, as well as their quantities, are well selected for work on obtaining composites that can be used in road or building construction. The results obtained for the tested modifications included material tests of composites containing waste fibers and cement substitutes. Based on experimental tests, it was demonstrated how modifications affect the material properties of composites. It was determined that cement substitutes do not affect such features as the consistency of the mixture, the density of the final composite, the number of air voids contained in it and the pH value. In turn, the use of powders determines the value of the elastic modulus, which decreases with the increase in the number of cement substitutes used or their combination. In the case of waste fibers, the opposite trend was observed. It is also worth noting that the proposed combination of cement substitutes and its impact on the material properties of the concrete composite have not been discussed in the available literature so far. Thermal tests were carried out using the impulse method. The analyzed temperature responses to heat flow impulses through a given composite allowed for the determination of basic values of heat transfer, specific heat and thermal diffusivity and their changes as a result of modifications made to the composition of individual materials. The test results showed a large variation in the tested parameters in the case of the composite reinforced with steel fibers and the unreinforced one. In the case of heat transfer and specific heat, the values increased, while thermal diffusivity decreased, with the amount of steel fibers used. An important element of this dissertation, which was also one of its main original elements, was the combination of modifications and the production of the final building product from a composite - concrete brick. Designing its composition was possible thanks to the results of laboratory tests of individual modifications. During tests of the final construction product, the digital image correlation (DIC) method was used, which allowed for determining the distribution of stresses over time in the tested material. Thanks to this, the method of its destruction in the compression test and in the three-point bending test was also described. During the tests, it was also possible to determine force-displacement relationships in both mentioned tests, which had not been previously published in domestic or foreign literature. Moreover, after the three-point bending test, microscopic observations of the damaged bricks were also carried out. It was observed that the destruction occurred in the cement matrix without prior pulling out of the fibers, which were evenly distributed in the fracture of the sample formed after destruction. Therefore, the construction product has been designed correctly. The obtained results confirmed that the presented approach makes it possible to properly design a cement composite with natural substitutes and waste materials, which shows increased mechanical properties compared to the cement composite itself before its modification.