

Janusz KONKOL¹
Grzegorz PROKOPSKI²

OPTYMALIZACJA SKŁADU BETONÓW Z DODATKIEM METAKAOLINITU

W artykule przedstawiono wyniki optymalizacji składu betonu modyfikowanego dodatkiem prażonego kaolinitu (metakaolinitu), użytego jako częściowy substytut cementu. Optymalizację przeprowadzono przy użyciu programu STATISTICA w oparciu o wyniki badań betonów o zróżnicowanym składzie, zdeterminowanym udziałem dodatku metakaolinitu do 15% masy spoiwa oraz stosunkiem woda/spoiwo od 0,35 do 0,54. Badania wykonano według centralnego kompozycyjnego planu doświadczenia, przewidującego wykonanie badań dziewięciu mieszanek betonowych o zróżnicowanym składzie. Jako kryteria optymalizacji przyjęto: maksimum wytrzymałości na ściskanie f_c po 28, 90 i 180 dniach dojrzewania betonu, maksimum krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic}^S i maksimum współczynnika sprężystości podłużnej E po 28 i 180 dniach dojrzewania betonu, minimum objętości porów powietrznych w betonie A oraz minimalny wymiar fraktalny określony metodą cięciwy D_C i metodą pudełkową D_{BC} . Objętość porów powietrznych określono na podstawie analizy płaskich przekrojów betonu metodami stereologicznymi. Analizie fraktalnej poddano uzyskane w badaniu odporności na pękanie powierzchniowe przełomów betonów. Optymalizację przeprowadzono dla trzech wariantów I, II i III. Uzyskane wyniki potwierdziły występowanie ściślejszej zależności między właściwościami a strukturą betonów, w tym betonów z dodatkiem metakaolinitu. Wykazano także, że ze względu na przyjęte kryteria optymalizacji celowe jest projektowanie betonów przy założeniu względnie niskiego stosunku woda/spoiwo oraz względnie dużego udziału dodatku metakaolinitu.

Słowa kluczowe: beton, metakaolinit, prażony kaolin, optymalizacja, planowanie doświadczeń, mechanika pękania, analiza struktury

1. Wprowadzenie

W projektowaniu betonów o pożądanых właściwościach, w tym także z uwzględnieniem aspektów strukturalnych, ostateczne rozwiązanie jest zwykle

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Janusz Konkol, Politechnika Rzeszowska, Zakład Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa, Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów; tel. 178651701; janusz.konkol@prz.edu.pl

² Grzegorz Prokopski, Zakład Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa, Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów; tel. 178651439; grzeprok@prz.edu.pl

pewnym kompromisem wynikającym z mnogości kryteriów, który może zostać ustalony na podstawie optymalizacji.

Rozwiązaniem optymalizacji wielokryterialnej jest punkt lub zbiór należący do dziedziny eksperymentu, charakteryzujący się możliwie optymalnymi właściwościami, ze względu na wszystkie kryteria optymalizacji. Jedną z metod optymalizacji umożliwiającą wprowadzenie wag, dla każdego z kryteriów, jest metoda uogólnionej funkcji użyteczności [1,2]. Jest ona często stosowaną metodą optymalizacji, polegającą na wyrażeniu wszystkich kryteriów we wspólnej skali użyteczności oraz utworzeniu następnie jednego kryterium w postaci, tzw. funkcji uogólnionej użyteczności. Trafność rozwiązania można wówczas określić na podstawie wartości funkcji użyteczności w danym punkcie dziedziny eksperymentu. Zaletą tej metody są możliwości uwzględnienia specyficznych wymagań związanych z przewidywanym zastosowaniem i związanymi z nim właściwościami projektowanego kompozytu betonowego.

Jednym z dodatków do betonu typu II jest metakaolinit (MK), obok pyłów krzemionkowych i popiołów lotnych, coraz powszechniej stosowany w budownictwie [3-13]. Metakaolinit uzyskuje się w procesie kalcynacji kaolinitowej gliny w temperaturze od 700°C do 900°C. Wprowadzony do składu mieszanki betonowej metakaolinit wchodzi w reakcję z wodorotlenkiem wapnia powstałym podczas hydratacji cementu (alitu i belitu). W wyniku tej reakcji powstają produkty zbliżone do uzyskanych w procesie hydratacji cementu. Z uwagi na dziesięciokrotnie mniejszą wielkość cząstek od cementu metakaolinit powoduje także uszczelnienie struktury betonu, przez co poprawia wiele jego właściwości. Z uwagi na brak analizy odporności na pękanie betonów modyfikowanych metakaolinitem celowe jest uwzględnienie tej właściwości przy projektowaniu składu betonu, jak również określenie optymalnego składu betonu o stosunkowo największej odporności na pękanie, przy zachowaniu pożądanych pozostałych jego właściwościach. Tak postawione zadanie wymaga zastosowania metod optymalizacyjnych.

2. Charakterystyka badanych betonów

2.1. Użyte materiały

Badane betony wykonano z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 32,5R (C), piasku kwarcowego frakcji do 2 mm (P), grysu bazaltowego frakcji do 16 mm (B), wody wodociągowej (W) oraz dodatku prażonego kaolinitu. Metakaolinit (MK) zastosowano jako częściowy substytut cementu, dokonując wymiany cementu na metakaolinit do maksymalnie 15% początkowej masy cementu.

2.2. Skład betonów

Skład mieszanek betonowych poszczególnych serii określono na podstawie planu centralnego kompozycyjnego. Łącznie wykonano 9 serii mieszanek beto-

nowych o zróżnicowanym udziale dodatku metakaolinitu oraz zmiennym stosunku woda/spoiwo (tab. 1) (spoiwo = C + MK). W celu utrzymania stałej konsystencji mieszanki betonowej użyto doświadczalnie ustalonej ilości superplastyfikatora FM-6 (tab. 1). Oznaczenie konsystencji mieszanki betonowej przeprowadzono metodą stolika rozpliwowego przy przyjęciu docelowego rozpliwu wynoszącego 410 mm.

Tabela 1. Skład mieszanek betonowych poszczególnych serii betonów

Table 1. The composition of concrete mixes of each series of concrete

Seria betonu	Zmienna		Skład mieszanki betonowej w kg na 1 m ³					
	w/s	MK/s	C	MK	W	P	B	FM-6 % m.c.
1	0,38	0,04	437,8	18,2	173,3	742,6	1218,0	1,25
2	0,38	0,13	395,6	59,1	172,8	740,4	1214,3	2,26
3	0,51	0,04	413,3	17,2	219,6	701,1	1149,8	0,22
4	0,51	0,13	373,5	55,8	218,9	699,1	1146,6	0,13
5	0,35	0,09	421,8	39,2	162,8	750,7	1231,2	2,45
6	0,54	0,09	388,9	36,1	228,2	692,1	1135,0	-
7	0,45	0,02	433,7	9,5	197,2	721,7	1183,6	0,44
8	0,45	0,15	375,8	65,6	196,4	718,7	1178,8	0,77
9	0,45	0,09	404,7	37,6	196,8	720,2	1181,2	0,44

3. Optymalizacja wielokryterialna

Optymalizację składu betonów modyfikowanych metakaolinitem przeprowadzono z uwzględnieniem kryteriów dotyczących właściwości opisanych zależnościami funkcyjnymi podanymi w pracach [8,9,12].

Wyróżniono 10 kryteriów uwzględniających zarówno właściwości wytrzymałościowe betonów, jak i ich strukturę, określone następująco:

- maksimum wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, $\max f_c^{28}$,
- maksimum wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach, $\max f_c^{90}$,
- maksimum wytrzymałości na ściskanie po 180 dniach, $\max f_c^{180}$,
- maksimum krytycznego współczynnika intensywności naprężeń po 28 dniach, $\max K_{Ic}^{S28}$,
- maksimum krytycznego współczynnika intensywności naprężeń po 180 dniach, $\max K_{Ic}^{S180}$,
- maksimum współczynnika sprężystości podłużnej po 28 dniach, $\max E^{28}$,
- maksimum współczynnika sprężystości podłużnej po 180 dniach, $\max E^{180}$,
- minimum objętości porów powietrznych w betonie, $\min A$
- minimum wymiaru fraktalnego określonego metodą cięciwy, $\min D_C$,
- minimum wymiaru fraktalnego określonego metodą pudełkową, $\min D_{BC}$,

W przypadku każdego kryterium określono wartość dolną, pośrednią i górną danej cechy, którym przypisano wartości użyteczności (tab. 2). W przypadku

kryterium maksymalizacji (kryterium max) wartości danego parametru wartości górnej przypisano wartość użyteczności 1,0, natomiast wartości dolnej wartość 0. Z uwagi na założenie liniowości zmian wartości użyteczności wartości pośredniej przypisano wartości użyteczności 0,5. W przypadku minimalizowania wartości danego parametru (kryterium min), wartości górnej przypisano wartość użyteczności 0, wartości dolnej cechy wartość użyteczności 1,0, a wartości pośredniej 0,5. W przypadku cech mechanicznych betonów wartość dolną przyjęto jako minimalną spośród wszystkich serii betonów powiększoną o 0,4 rozstępu, wartość pośrednią powiększoną o 0,6 rozstępu, a górną powiększoną o 0,8 rozstępu. W przypadku wartości górnej stanowi ona od 92 do 96 % wartości maksymalnej z badań.

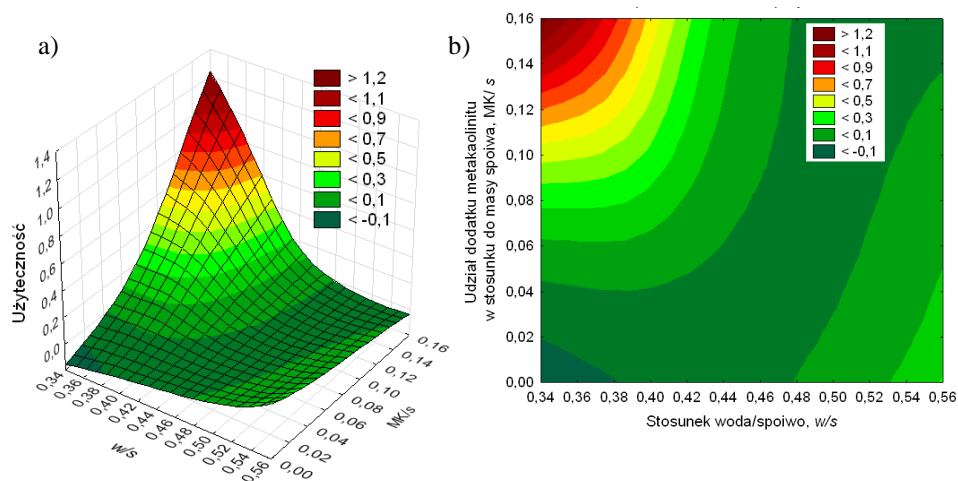
Tabela 2. Przyjęte wartości użyteczności: dolna, środkowa i górna wraz z odpowiadającymi im wartościami danej właściwości betonu modyfikowanego metakaolinitem

Table 2. The values of utility: lower, average and upper, along with the corresponding values of the properties of modified concrete with metakaolinite

Właściwość	Parametry funkcji użyteczności					
	Wartość dolna	Wartość użyteczności	Wartość średnia	Wartość użyteczności	Wartość górna	Wartość użyteczności
f_c^{28}	47,8	0,0	52,7	0,5	57,7	1,0
K_{Ic}^{S28}	1,19	0,0	1,32	0,5	1,45	1,0
E^{28}	31,2	0,0	33,0	0,5	34,7	1,0
f_c^{90}	62,2	0,0	68,2	0,5	74,1	1,0
f_c^{180}	65,2	0,0	71,2	0,5	77,2	1,0
K_{Ic}^{S180}	1,47	0,0	1,55	0,5	1,64	1,0
E^{180}	34,3	0,0	36,9	0,5	39,5	1,0
A	0,028	1,0	0,029	0,5	0,031	0,0
D_C	1,029	1,0	1,030	0,5	1,032	0,0
D_{BC}	1,050	1,0	1,052	0,5	1,054	0,0

Optymalizację przeprowadzono w module *Planowanie doświadczeń* w programie *STATISTICA*.

Początkowo optymalizację przeprowadzono dla wszystkich kryteriów (wersja I). Na podstawie tej optymalizacji uzyskano funkcję użyteczności przedstawioną na rys. 1; otrzymane rozwiązanie preferowane przedstawiono w tab. 3. Wartość funkcji użyteczności rozwiązania optymalnego dla wersji I optymalizacji wynosi 0,91 (tab. 3). Najlepsze rozwiązanie otrzymano przy stosunku w/s wynoszącym 0,37 i udziale metakaolinitu 15% masy spoiwa ($MK/s = 0,15$).



Rys. 1. Funkcja użyteczności dla betonu z dodatkiem metakaolinitu (wersja I) – wykres powierzchniowy (a) i warstwiczny (b)

Fig. 1. The utility function for concrete with the addition of metakaolinite (version I) - surface chart (a) and contour graph (b)

Tabela 3. Rozwiązanie optymalne ze względu na przyjęte kryteria optymalizacji

Table 3. The optimal solution due to the optimization criteria adopted

Zmienna/ Właściwość	Wartości wielkości wejściowych oraz aproksymowane odpowiedzi przy podanych poziomach wielkości wejściowych		
	Wersja I	Wersja II	Wersja III
w/s	0,37	0,37	0,37
MK/s	0,15	0,15	0,15
f_c^{28}	65,0	65,0	65,0
$K_{Ic}^{S 28}$	1,56	1,56	1,56
E^{28}	36,2	36,2	36,2
f_c^{90}	74,3	74,3	74,3
f_c^{180}	81,6	81,6	81,6
$K_{Ic}^{S 180}$	1,74	1,74	1,74
E^{180}	40,7	40,7	40,7
A	0,029	-	-
D_C	1,026	1,026	-
D_{BC}	1,050	1,050	-
Wartość funkcji użyteczności	0,91	1,00	1,00

Otrzymany rezultat optymalizacji potwierdza korzystne działanie dodatku metakaolinitu na poprawę badanych właściwości betonów oraz parametrów

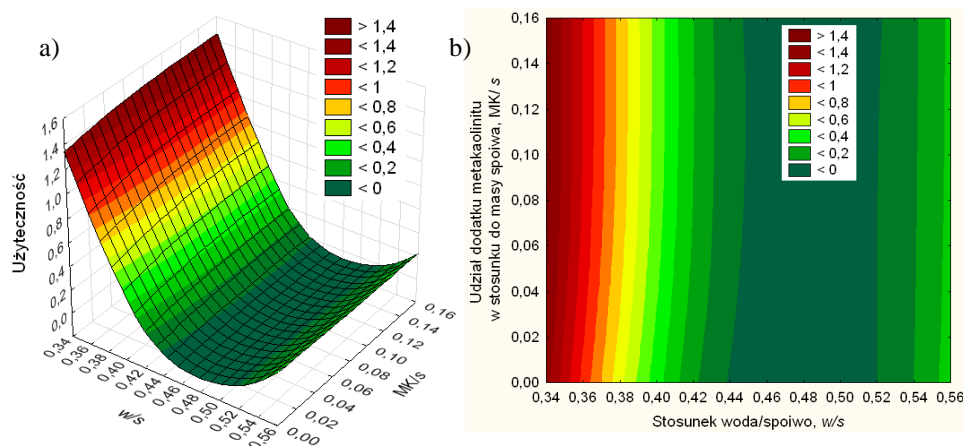
morfologii powierzchni przełomu i parametrów stereologicznych. Skład betonu o największej użyteczności przedstawiono w tab. 4.

Tabela 4. Zestawienie składu optymalnego mieszanek betonowych betonu modyfikowanego metakaolinitem

Table 4. Optimal composition of concrete mixes of modified concrete

Wersja	Zmienna		Skład mieszanki betonowej po przeliczeniu według przyjętego planu, kg/m ³				
	w/s	MK/s	C	MK	W	P	B
I, II i III	0,37	0,15	388,4	67,8	169,5	742,8	1218,3

Na podstawie dalszej analizy rozwiązania preferowanego i uzyskanych wartości danych cech stwierdzono znaczący wpływ na wynik optymalizacji zawartości powietrza *A*. Eliminacja kryterium minimalizacji porowatości powoduje wzrost wartości funkcji użyteczności z 0,91 do 1,00. Wyniki optymalizacji (wersja II) zestawiono w tab. 4, a uzyskaną funkcję użyteczności przedstawiono na rys. 2. Porównanie wyników dla wersji optymalizacji I i II wskazuje, że oba rozwiązania optymalne dotyczą tego samego betonu (tab. 4).



Rys. 2. Funkcja użyteczności dla betonu z dodatkiem metakaolinitu z pominięciem kryterium minimalizacji porowatości (wersja II) – wykres powierzchniowy (a) i warstwiczny (b)

Fig. 2. The utility function for concrete with the addition of metakaolinite without the criterion of minimum porosity (version II) – surface chart (a) and contour graph (b)

Stwierdzono, że na wartość funkcji użyteczności wpływa w większym stopniu stosunek woda/spoiwo. Wpływ dodatku metakaolinitu powyżej około 4% w stosunku do masy spoiwa był już nieznaczny (rys. 2).

Przeprowadzono także optymalizację tylko ze względu na kryteria wytrzymałościowe (wersja III). W wyniku obliczeń otrzymano identyczne rozwiązanie

punktu optymalnego (tab. 3 i 4), w obszarze zmiennych w/s i MK/s , a jednocześnie skład betonu dla rozwiązania optymalnego w wersji III, jest taki sam jak w rozwiązaniach I i II.

Uzyskanie tego samego rozwiązania przy pominięciu wymiaru fraktalnego potwierdza istnienie związku między parametrami mechanicznymi, a parametrami fraktalnymi charakteryzującymi powstałą na skutek pęknięcia powierzchni przelomu.

4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonej optymalizacji wielokryterialnej składu betonów modyfikowanych dodatkiem metakaolinitu uzyskano rozwiązania preferowane, optymalne ze względu na przyjęte kryteria optymalizacji. Uzyskane rozwiązania pokazują, że w przypadku dodatku metakaolinitu celowe jest projektowanie betonów przy założeniu niskiego stosunku woda/spoiwo i względnie dużego udziału tego dodatku. Uzyskane rezultaty są ważne w zakresie zmienności ilości dodatku MK do 15% masy spoiwa oraz w zakresie zmienności stosunku woda/spoiwo od 0,35 do 0,54.

Praca naukowa częściowo finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy nr N N507 475337 oraz ze środków Narodowego Centrum Nauki w latach 2011-2013 jako projekt badawczy nr N N507 321140.

Literatura

- [1] Metody optymalizacji materiałów kompozytowych o matrycach cementowych, red. A. M. Brandt, Studia z Zakresu Inżynierii, 38, Warszawa, 1994.
- [2] Konkol J., Prokopski G.: Optymalizacja wielokryterialna składu betonów zwykłych z uwzględnieniem parametrów wytrzymałościowych i strukturalnych, Przegląd Budowlany, nr 2, 2006, s. 23-28.
- [3] Sabir BB, Wild S, Bai J.: Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, Cem. Concr. Compos, vol. 23, 2001, pp. 441-454.
- [4] Siddique R, Klaus J.: Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, Appl. Clay Sci., vol. 43, 2009, pp. 392-400.
- [5] Rashad AM.: Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview, Constr. Build. Mater., vol. 41, 2013, pp. 303-318.
- [6] Konkol. J.: Metakaolinit i popiół fluidalny jako alternatywne w stosunku do pyłów krzemionkowych dodatki mineralne do betonu, Inżynieria i Budownictwo, nr 9, 2012, s. 503-507.
- [7] Konkol J., Pyra M.: Wybrane właściwości betonów modyfikowanych zmiennym udziałem dodatku metakaolinitu. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXXI, z. 61 (3/II/14), 2014, s. 287-296, DOI:10.7862/rb.2014.95.

- [8] Konkol J., Prokopski G.: The influence of the age of concretes with FBC fly ash or metakaolinite additives on their strength properties. *Road and Bridges – Drogi i Mosty*, 13(1), 2014, s. 49-67.
- [9] Konkol J.: Wykorzystanie parametrów fraktalnych i stereologicznych do opisu odporności na pękanie betonów modyfikowanych wybranymi dodatkami typu II, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, seria Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, z 59, nr 3/2012/III, 2012, s. 222-232.
- [10] Konkol J.: Wykorzystanie geometrii fraktalnej do określenia odporności na pękanie betonu modyfikowanego metakaolinitem, *Budownictwo i Architektura*, 12(3), 2013, s. 177-184.
- [11] Konkol J., Prokopski G.: Fraktalny opis powierzchni przełomu betonów cementowych. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, t. XXXI, z. 61 (3/II/14), 2014, s. 273-286, DOI:10.7862/rb.2014.94.
- [12] Konkol J., Prokopski G.: Morfologia przełomu oraz odporność na pękanie betonów modyfikowanych dodatkiem popiołu fluidalnego lub metakaolinitu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, z. 58, nr 3/11/III, 2011, s. 321-330.
- [13] Konkol J., Prokopski G.: Fracture toughness and fracture surfaces morphology of metakaolinite-modified concrete. *Constr. Build. Mater.*, vol. 123, 2016, pp. 638-648.

OPTIMIZATION OF THE CONCRETE COMPOSITION WITH METAKAOLINITE ADDITION

Summary

This paper presents the results of optimization of composition of the concretes modified with calcined kaolin (metakaolinite). The analysis was performed according to the results of investigations base of central composite design of experiment. The amount of metakaolinite used as used as an equivalent of cement varied from 2% to 15% of the mass of binder. Water/binder ratios (w/b) in the mixes were in the range of 0.35 to 0.54.

On the basis of multi-criteria analysis, the optimal compositions of concrete mixes were established for the adopted criteria optimization. The optimization criteria were: maximal compressive strength f_c after 28, 90 and 180 days of concrete curing, maximal value of critical stress intensity factor K_{Ic}^S (maximal fracture toughness) and maximal elastic modulus E after 28 and 180 days of concrete curing, minimal porosity of hardened concrete and minimal value of fractal dimension (divider method D_C and box counting method D_{BC}).

The optimal solutions were obtained for water/binder ratio below 0.37 and amount of metakaolinite 15% of the mass of binder. The optimum composition is as follows: 388.4 kg of cement, 67.8 kg of metakaolinite, 169.5 l of water, 742.8 kg of sand and 1218.3 kg of basalt.

Keywords: concrete, metakaolinite, calcined kaolin, optimization, design of experiments, fracture mechanics, structure analysis

DOI:10.7862/rb.2016.274

Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 20.12.2016 r.