

dr inż. Wojciech Żebrowski^{1*)}
 dr inż. Paweł Wolka¹⁾
 dr inż. Adam Zieliński²⁾
 ORCID: 0000-0001-7949-1831
 dr inż. Mariusz Dąbrowski³⁾
 ORCID: 0000-0003-1581-7093

Ograniczenie korozji ASR w betonie za pomocą metakaolinu MK-40 i tradycyjnych dodatków mineralnych

Reduction of ASR corrosion in concrete using metakaolin MK-40 and traditional mineral additives

DOI: 10.15199/33.2022.03.09

Streszczenie. Artykuł prezentuje badania związane z ograniczeniem korozji ASR w betonie, wywołanej przez reaktywne kruszywo drobne, za pomocą dodatków mineralnych. W tym celu użyto metakaolinu MK-40, popiołu lotnego oraz żużla wielkopieczowego. Badania wykonano zgodnie z krajowymi procedurami badawczymi GDDKiA bazującymi na zmodyfikowanych metodach ASTM oraz RILEM AAR. Pozwoliły one określić procentowe ograniczenie ekspansji w przypadku poszczególnych zapraw cementowych. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że możliwe jest ograniczenie ekspansji zaprawy z piaskami reaktywnymi przez zastosowanie wybranych dodatków mineralnych.

Słowa kluczowe: ASR; beton; żużel wielkopieczowy; popiół lotny; metakaolin.

Abstract. Article presents research related to the reduction of ASR corrosion induced by reactive fine aggregate in concrete with the use of mineral additives. For this purpose, MK-40 metakaolin, fly ash and blast furnace slag were used. The tests were carried out according to the national GDDKiA test procedures based on the modified ASTM and RILEM AAR methods. Tests allowed to determine the percentage expansion limitation for individual cement mortars. Based on the test results, it is possible to limit the expansion of the mortar with reactive sands by using selected mineral additives.

Keywords: ASR; concrete; blast furnace slag; fly ash; metakaolin.

Jedną z przyczyn zmniejszenia trwałości betonu jest pojawienie się ekspansywnych produktów reakcji krzemionki występującej w niektórych rodzajach kruszyw (w wyniku reakcji z wodorotlenkami sodu i potasu zawartymi przede wszystkim w cemencie). W przypadku uszkodzeń nawierzchni czy elementów betonowych, spowodowanych tego typu korozją, konieczna jest kosztowna naprawa lub całkowita rozbiórka konstrukcji. Problem niszczenia betonu wskutek ASR (z ang. *alkali-silica-reaction*), po raz pierwszy na świecie dostrzeżono w USA (w stanie Kalifornia) na początku lat trzydziestych ubiegłego wieku. W 1940 r. Stanton wykazał, że ekspansja beleczek zaprawy uzależniona jest od ekwiwalentnej zawartości alkaliów w cemencie ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ – suma alkaliów: $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$), rodzaju i ilości reaktywnej krzemionki w kruszywie, wilgotności i temperatury, a skuteczną me-

todą zapobiegania reakcji może być dodatek pucolanowy [1]. Od tego czasu badacze z różnych części świata donosili o ekspansji ASR w strukturze betonu. Wystąpienie ASR jest skutkiem pojawienia się w kruszywie aktywnej chemicznie formy krzemionki. Reaktywność alkaliczną może również wykazywać kwarc w stanie naprężenia w skałach metamorficznych i magmowych [2]. Czynnikiem koniecznym do wystąpienia ASR jest też obecność KOH i NaOH w cieczy porowej oraz wilgoć wewnątrz matrycy cementowej umożliwiająca postęp reakcji i pęcznienia.

W wyniku reakcji krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu powstaje w betonie żel, który absorbuje wodę z otaczającego zaczynu cementowego lub ze środowiska zewnętrznego i zwiększa swoją objętość oraz wywołuje ciśnienie przekraczające wytrzymałość betonu na rozciąganie, powodując jego rozszerzanie i pękanie. Wśród czynników kształtujących szybkość reakcji ASR wymienia się temperaturę, wilgotność, pH cieczy porowej, wielkość ziaren kruszywa oraz stopień uporządkowania struktury reaktywnej krzemionki. Natomiast zapobieganie lub ograniczenie

reakcji ASR w betonie możliwe jest przez stosowanie cementów o małej zawartości KOH i NaOH oraz pucolanowych i hydraulicznych dodatków mineralnych [3].

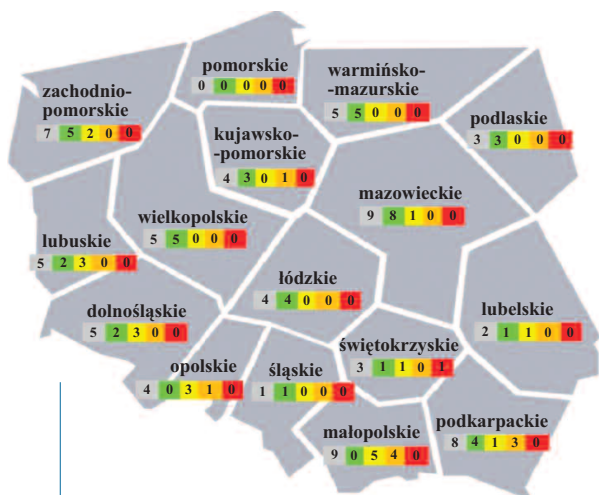
W przypadku inwestycji związanych z infrastrukturą drogową w Polsce wielu wykonawców, podwykonawców oraz producentów betonu zmagają się ostatnio z problemem dostępności niereaktywnego kruszywa drobnego kategorii R0 (rysunek 1). W związku z tym podjęto się badań, których celem jest określenie wpływu dodatku pucolanowego metakaolinu (MK-40) na ograniczenie zniszczeń wskutek ASR w przypadku stosowania reaktywnego kruszywa drobnego. Metakaolin to posiadający właściwości pucolanowe, aktywowany w wyniku prażenia, naturalny kaolin. Reaguje z wodorotlenkiem wapnia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zawartym w mieszance betonowej, tworząc dodatkowe fazy C-S-H. Proces ten wpływa na poprawę wielu parametrów fizykochemicznych stwardniałych kompozytów cementowych. Zmniejszenie zawartości wodorotlenku wapnia powstającego podczas hydratacji cementu wpływa także na poprawę odporności betonu na agresję siarczanową, chlorkową i ASR [4].

¹⁾ Astra Technologia Betonu Sp. z o.o.

²⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

³⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

^{*} Adres do korespondencji: wojciech@astra-polska.com



■ sumaryczna liczba złóż w danym województwie
 ■ liczba złóż w kategorii R0 w danym województwie
 ■ liczba złóż w kategorii R1 w danym województwie
 ■ liczba złóż w kategorii R2 w danym województwie
 ■ liczba złóż w kategorii R3 w danym województwie

Rys. 1. Liczba złóż kruszywa drobnego w danej kategorii reaktywności, z podziałem na województwa

Dane zgodne z GDDKiA, stan na 31.05.2021 [5]
 Fig. 1. Number of fine aggregate deposits in a given reactivity category, divided voivodships

Badano również inne dodatki pucolano-we i hydrauliczne, takie jak krzemionkowy popiół lotny kategorii A oraz granulowany żużel wielkopieczowy, które są powszechnie dostępne i stosowane w betonach.

Badania

Istotą oceny zagrożenia wynikającego z reakcji alkalia-krzemionka (ASR) jest określenie kategorii reaktywności kruszywa i warunków środowiskowych, w których dany obiekt będzie eksploatowany. Jedną z metod badawczych umożliwiających klasyfikację jest analiza wyników pomiaru wydłużenia próbek zaprawy i betonu metodą przyspieszoną [6] i/lub metodą długoterminową [7], bazujących na metodach przedstawionych w normach ASTM z modyfikacjami wymaganymi w warunkach krajowych i dokumentach RILEM AAR. Kruszywa klasyfikowane są, w zależności od ich reaktywności, od kategorii R0 (niereaktywne) do kategorii R3 (bardzo silnie reaktywne). Klasyfikacje łącznie z zakresami odniesienia podają Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych [8].

W przypadku kruszyw drobnych sklasyfikowanych jako R0 w wyniku przeprowadzenia badań metodą przyspieszoną, wydłużenie próbek po 14 dniach

zanurzenia beleczek badawczych zaprawy w 1M roztworze NaOH w 80°C nie może być większe niż 0,15%. W innych przypadkach klasyfikacja odbywa się zgodnie z zasadami podanymi w tabeli 1.

Doświadczenia [9, 10] oraz wymagania [8] wskazują na możliwość zastosowania środków zapobiegających negatywnym efektem reakcji alkalia-krzemionka w betonie, takich jak:

- ograniczenie zawartości alkaliów (Na_2O_{eq});
- zastosowanie doświadczalnie potwierdzonej ilości dodatków mineralnych;
- jednocześnie ograniczenie zawartości alkaliów i zastosowanie dodatków mineralnych.

W wymaganiach [8] podano pozytywny wpływ popiołu lot-

Tabela 2. Parametry piasków wykorzystanych do badań zgodnych z [13]

Table 2. Parameters of sands used for tests in accordance with [13]

Parametr	Piasek R1	Piasek R2
Wymiar ziarna, d/D [mm]	0/2	0/2
Klasa uziarnienia	G _F 85	G _F 85
Zawartość pyłów	f ₃	f ₃
Gęstość ziarn: ρ _a /ρ _{rel} /ρ _{ssd} [g/cm ³]	2,59/2,57/2,52	2,66/2,64/2,65

niami procedury PB/1/18 [6], o zawartości alkaliów $Na_2O_{eq} = 0,90\%$. Zastosowano także dodatki mineralne, potencjalnie ograniczające skutki reakcji alkalia-krzemionka w postaci: krzemionkowego popiołu lotnego kategorii A, N, zgodnego z wymaganiami normy PN-EN 450-1 [11], granulowanego żużla wielkopieczowego zgodnego z wymaganiami normy PN-EN 15167-1 [12] i metakaolinu MK-40 o parametrach jak podano w tabeli 3, posiadającego

Tabela 1. Kategoryzacja reaktywności kruszyw do betonu na podstawie metody przyspieszonej [8]

Table 1. Categorization of aggregate reactivity to concrete based on the accelerated method [8]

Metoda badawcza	Kategoria reaktywności kruszywa					
	niereaktywne R0		umiarkowanie reaktywne R1		silnie reaktywne R2	bardzo silnie reaktywne R3
	kruszywo drobne	kruszywo grube	kruszywo drobne	kruszywo grube	kruszywo drobne; kruszywo grube	kruszywo drobne; kruszywo grube
Procedura badawcza GDDKiA PB/1/18 (metoda przyspieszona)	wydłużenie próbek zaprawy po 14 dniach [%]					
	≤ 0,15	≤ 0,10	> 0,15; ≤ 0,30	> 0,10; ≤ 0,30	> 0,30; ≤ 0,45	> 0,45

nego krzemionkowego spełniającego wymagania normy PN-EN 450-1 [11] oraz granulowanego żużla wielkopieczowego, zgodnego z wymaganiami normy PN-EN 15167-1 [12]. Nie ma jednak odniesienia do innych dodatków mineralnych, nieobjętych krajową klasyfikacją, a z powodzeniem stosowanych w innych krajach na świecie. Przykładem może być naturalna pucolana w postaci metakaolinu.

Materiały i metody badań.

W badaniach wykorzystano krajowe piaski o reaktywności R1 (na granicy kategorii R0 i R1) oraz R2, o parametrach pokazanych w tabeli 2, a także cement portlandzki CEM I 42,5R zgodny z wymaga-

Krajową Ocenę Techniczną ICiMB-KOT-2021/0100.

Zawartość zastosowanego popiołu lotnego i żużla wielkopieczowego określono zgodnie z wytycznymi GDDKiA [8]. Dodatek metakaolinu dozowano, bazując na [10, 16], w ilości 5; 10; 15%, jako wagowy zamiennik cementu. Wy-

Tabela 3. Właściwości metakaolinu

Table 3. Properties of metakaolin

Parametr	Zgodność	Wartość
Wskaźnik aktywności po 28 dniach [%]	PN-EN 450-1:2012	115,7
Wskaźnik aktywności po 90 dniach [%]	PN-EN 450-1:2012	114,3
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	PN-EN 196-6:2011	15790
Miałość [%]	PN-EN 451-2:2017	17,7

trzymałość na ściskanie zapraw przeprowadzono zgodnie z [14], po pielęgnacji przez 1, 2 i 7 dni w wilgotności RH > 95% i temperaturze 23 ± 1°C. Proporcje użytych składników podano w tabeli 4.

Reaktywność kruszyw określono metodą przyspieszoną [6], a badania skuteczności ograniczenia szkodliwości reakcji alkalia-krzemionka zgodnie z procedurą badawczą GDDKiA PB/4/18 [15]. Metoda przyspieszona polega na pomiarze wydłużenia beleczek zaprawy o wymiarach 25 x 25 x 285 mm, w okresie kondycjonowania ich przez 28 dni w 1M roztworze wodorotlenku sodu (NaOH) w temperaturze 80°C. Porównuje się wydłużenie próbek wykonanych z tego samego kruszywa i cementu, bez dodatku i z dodatkami mineralnymi (tabela 5).

Tabela 4. Skład zapraw cementowych – normowy i z dodatkami mineralnymi do badania wytrzymałości na ściskanie

Table 4. Composition of cement mortars – standard and with mineral additives, for the compressive strength test

Składniki	Normowa	Metakaolin				Żużel wielkopiecowy 35%
		5%	10%	15%	20%	
Cement	450	427,5	405	382,5	360	292,5
Dodatek mineralny	0	22,5	45	67,5	90	157,7
Woda	225					
Piasek normowy	1350					

Tabela 5. Skład zapraw cementowych – referencyjny i z dodatkami mineralnymi do badania reaktywności kruszyw

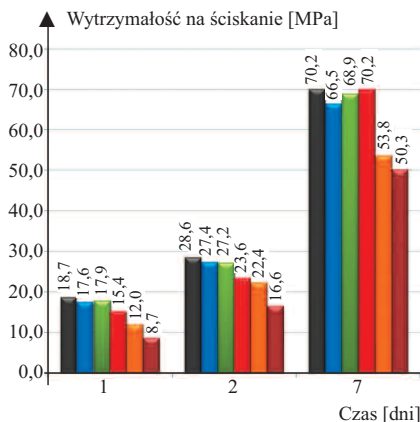
Table 5. Composition of cement mortars – reference and with mineral additives, for the tests of aggregate reactivity

Składniki	Referencyjna	Metakaolin				Żużel wielkopiecowy 35%
		5%	10%	15%	20%	
Cement	440	418	396	374	352	286
Dodatek mineralny	0	22	44	66	88	154
Woda	206,8	206,8	206,8	206,8	206,8	206,8
Piasek*	990	990	990	990	990	990

*) piasek R1 albo piasek R2

Wyniki badań

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki oznaczenia wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych. Te z dodatkami mineralnymi, we wczesnym wieku, cha-



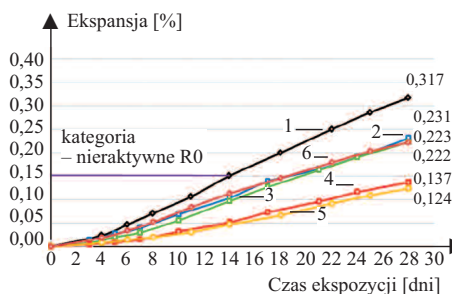
Oznaczenia: ■ normowa; ■ metakaolin 5%; ■ metakaolin 10%; ■ metakaolin 15%; ■ popiół lotny 20%; ■ żużel wielkopiecowy

Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych (wg PN-EN 196-1), po okresie pielęgnacji w temperaturze 23°C

Fig. 2. Results of compressive strength of mortars according to PN-EN 196-1, after the curing period at the temperature of 23°C

rakteryzują się małym przyrostem wytrzymałości na ściskanie w stosunku do zapraw cementowych. Dysproporcja zmniejsza się wraz z czasem dojrzewania. Po upływie 7 dni zaprawy z metakaolinem mają podobną wytrzymałość na ściskanie jak zaprawa normowa z cementem CEM I 42,5R. Przyrost wytrzymałości na ściskanie zaprawy z dodatkiem popiołu lotnego i żużla wielkopiecowego jest znacznie mniejszy niż zaprawy bez dodatku, jak również z dodatkiem metakaolinu.

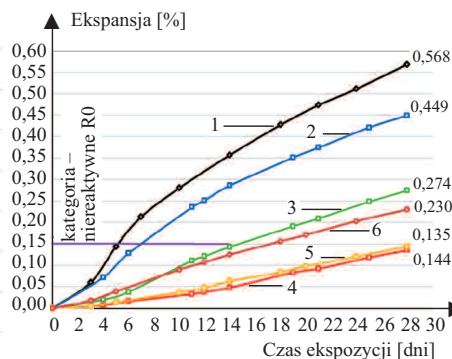
Wyniki pomiarów wydłużenia próbek zapraw w przypadku piasku R1 oraz piasku R2, po 28 dniach ekspozycji w 1M roztworze wodorotlenku sodu, przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Prze-



Oznaczenia: 1 – piasek R1; referencyjna; 2 – piasek R1, metakaolin 5%; 3 – piasek R1, metakaolin 10%; 4 – piasek R1, metakaolin 15%; 5 – piasek R1, popiół lotny 20%; 6 – piasek R1, żużel wielkopiecowy 35%

Rys. 3. Średnie wydłużenie próbek zapraw z piaskiem R1 podczas kondycjonowania w 1M roztworze NaOH w temperaturze 80°C

Fig. 3. The average elongation of mortars samples with R1 sand during conditioning in 1M NaOH solution at temperature 80°C



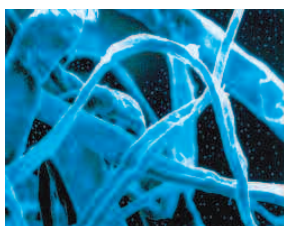
Oznaczenia: 1 – piasek R2, referencyjna; 2 – piasek R2, metakaolin 5%; 3 – piasek R2, metakaolin 10%; 4 – piasek R2, metakaolin 15%; 5 – piasek R2, popiół lotny 20%; 6 – piasek R2, żużel wielkopiecowy 35%

Rys. 4. Średnie wydłużenie próbek zapraw z piaskiem R2 podczas kondycjonowania w 1M roztworze NaOH w temperaturze 80°C

Fig. 4. The average elongation of mortars samples with R2 sand during conditioning in 1M NaOH solution at temperature 80°C

prowadzone pomiary wydłużenia próbek zaprawy z piaskiem R1 i bez dodatków mineralnych wyniosło po 14 dniach 0,151%, a z piaskiem R2 – 0,357%. Wydłużenie próbek zaprawy z dodatkami mineralnymi jest znacznie mniejsze niż referencyjnej, niezależnie od zastosowanego piasku. Świadczy to o korzystnym wpływie dodatków mineralnych w przypadku stosowania piasków reaktywnych oraz efekcie hamowania postępującej reakcji alkalicznej w czasie. Z uzyskanych wyników badań wynika, że w przypadku zaprawy z piaskiem o kategorii silnie reaktywnej (R2), przez zastosowanie odpowiedniej ilości dodatków mineralnych, można ograniczyć ekspansję zaprawy poniżej 0,15%. Procentową efektywność hamowania reakcji alkalicznej w przypadku poszczególnych dodatków, w stosunku do zapraw referencyjnych, zamieszczono w tabeli 6.

Najkorzystniejszy efekt ograniczenia ekspansji zaprawy wskutek zachodzącej reakcji alkalicznej kruszywa uzyskano w przypadku zapraw, które zawierały 15% metakaolinu lub 20% popiołu lotnego. Największe zahamowanie ekspansji zauważono w przypadku zapraw z piaskiem R2 i 15-proc. udziałem metakaolinu. Uzyskane wyniki badań pokazują, że zastosowanie odpowiednich dodatków mineralnych do kompozytów ce-



ARBOCEL – The Power of Reinforcement

– wyjątkowe włókna na bazie celulozy, redukujące ilość powstających rys/mikropęknięć i spękań tynków, szpachli i farb



Rettenmaier Polska
Sp. z o.o.
Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B
02-366 Warszawa
mobile +48 600 423 423
Tel + 48 22 608 51 00
e-mail: arbocel@jrs.pl

Tabela 6. Procentowa efektywność hamowania ekspansji próbek w wyniku zastosowania dodatku mineralnego w składzie zaprawy cementowej

Table 6. Percentage effectiveness of inhibiting the expansion of samples, due to the use of a mineral additive in the composition of the cement mortar

Oznaczenie zaprawy	Piasek R1		Piasek R2	
	czas [dni]			
	14	28	14	28
	Efektywność hamowania reakcji alkalicznej [%]			
Normowa	0,0	0,0	0,0	0,0
Metakaolin 5%	31,1	27,1	19,9	21,0
Metakaolin 10%	35,8	29,7	59,9	51,8
Metakaolin 15%	65,6	56,8	86,6	76,2
Popiół lotny 20%	68,9	60,9	82,4	74,6
Żużel wielkopieczowy 35%	25,2	30,0	65,0	59,5

mentowych może skutecznie zmniejszyć stopień reakcji alkalicznej. Zasadne jest kontynuowanie oceny skuteczności hamowania reaktywności alkalicznej kruszywa przez dodatki mineralne także w betonach z kruszywem grubym i zewnętrznym dostępem alkaliów.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- zarówno znane, jak i nowe dodatki mineralne mogą skutecznie ograniczać ekspansję zaprawy cementowej, powstającej wskutek reakcji alkalia-krzemionka. W badaniach użyto metakaolinu, którego właściwości nie są sklasyfikowane normowo (brak normy odniesienia), natomiast ma on Krajową Ocenę Techniczną ICiMB-KOT-2021/0100;
- zaprawy cementowe z dodatkami mineralnymi mają mniejszą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu z zaprawami bez dodatków. Najmniejszy spadek wytrzymałości zaobserwowano w przypadku metakaolinu, następnie popiołu lotnego i na końcu żużla wielkopieczowego;
- wpływ stosowania 15% dodatku metakaolinu lub 20% popiołu lotnego do zahamowania negatywnych skutków reakcji alkalicznej był podobny i stanowił najefektywniejsze rozwiązanie używane podczas badań;
- istnieje możliwość ograniczenia wydłużenia próbek zaprawy z wybranymi

mi dodatkami mineralnymi i piaskami reaktywnymi po 14 dniach poniżej granicznej wartości 0,15%.

Literatura

[1] Stanton T. E. 1941. „Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate”. *Proc. American Society of Civil Engineers* 66 (10): 1781 – 1811.

[2] Józwiak-Niedźwiedzka D., A. Antolik, K. Dziezdzic, M. A. Glinick, K. Gibas. 2019. „Resistance of selected aggregates from igneous rocks to alkali-silica reaction: verification/Weryfikacja odporności wybranych kruszyw ze skał magmowych na reakcję z alkaliami”. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*. DOI: 10.7409/rabd. 019.005.

[3] Saha A. K., M. N. Khan, P. K. Sarker, F. A. Shaikh, A. Pramanik. 2018. „The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review”. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.183>

[4] Małaszkiwicz D. 2015. „Metakaolinit jako pucolanowy dodatek do betonu – przegląd stanu wiedzy”. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 6: 81 – 94.

[5] <https://www.gov.pl/web/gddkia/nie-brakuje-dobrych-kruszyw-do-budowy-drog>; data dostępu: 28.02.2022 r.

[6] Procedura Badawcza GDDKiA PB/1/18. Instrukcja badania reaktywności kruszyw metodą przyspieszoną w 1 M roztworze NaOH w temperaturze 80°C.

[7] Procedura Badawcza GDDKiA PB/2/18. Instrukcja badania reaktywności kruszyw w temperaturze 38°C według ASTM C1293/RILEM AAR-3.

[8] Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich. OT1-1C/ICMB-IPPT. 2019.

[9] Fournier B., R. Chevier, A. Bilodeau, P. C. Nkineamubanzi, N. Bouzoubaa. 2016. *Comperative field and laboratory investigations on the use of supplementary cementong materails (SCMS) to control alkali silica reaction (ASR) in concrete*. 15 th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Sao Paulo, Brasil.

[10] Ramlochan T., M. Thomas, K. A. Gruber. 2000. „The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete”. *Cement and Concrete Composites* 67; 339 – 344.

[11] PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.

[12] PN-EN 15167-1: 2007 Mielony granulowany żużel wielkopieczowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.

[13] PN-EN 12620+A1: 2010 Kruszywa do betonu.

[14] PN-EN 196-1: 2016. Metody badania cementu. Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.

[15] Procedura Badawcza GDDKiA PB/4/18. Określenie potencjalnej reaktywności mieszaniny cementu, dodatków mineralnych i kruszyw według zmodyfikowanej metody ASTM C1567.

[16] Zapala-Sławeta J., Z. Owsiak. 2020. „Wybrane metody przeciwdziałania skutkom reaktywności kruszywa żwirowego”. *Inżynieria i Budownictwo* 11 (11): 542 – 546.

Przyjęto do druku: 01.03.2022 r.