POPIÓŁ LOTNY KRZEMIONKOWY JAKO DODATEK ZAPEWNIAJĄCY OCHRONĘ BETONU PRZED KOROZJĄ ASR

Mikołaj Ostrowski, Tomasz Baran,
Piotr Francuz, Paweł Pichniarczyk
Sieć Badawcza Łukasiewicz, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych,
Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie

STRESZCZENIE

Skuteczność zapobiegania reakcji ASR (alkali-silica reaction) w betonie można kształtować poprzez stosowanie niereaktywnego kruszywa, zapewnienie niskiej zawartości alkaliów; sodu i potasu w mieszance betonowej, stosowanie cementów niskoalkalicznych kształtujących niską alkaliczność cieczy porowej betonu lub stosowanie dodatków mineralnych.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań zapobiegania reakcji ASR w betonie poprzez stosowanie dodatków mineralnych pucolanowo-hydraulicznych. Program badawczy, prowadzony dla kruszyw pozyskanych w ramach realizacji projektu RID „Reaktywność alkaliczna krajowych kruszyw", uwzględniał stosowanie cementu portlandzkiego CEM I bez dodatków oraz cementów specjalnych niskoalkalicznych wieloskładnikowych z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego oraz granulowanego żużla wielkopiecowego. Zakres badań uwzględniał dużą grupę kruszyw krajowych o zróżnicowanym stopniu reaktywności alkalicznej.

Zaawansowany program badań pomiarów ekspansji alkalicznej zapraw, według przyspieszonej metody ASTM C 1260-14, wykazał możliwość skutecznego zapobiegania destrukcji w wyniku reakcji ASR betonu z kruszyw reaktywnych., poprzez stosowanie cementów wieloskładnikowych z odpowiednio dużą zawartością dodatku popiołu lotnego krzemionkowego i/lub granulowanego żużla.

1.WSTĘP

Występowanie reakcji alkalicznej w kruszywie, pomimo wieloletnich badań nie jest jeszcze do końca wyjaśnione. Opisując mechanizm reakcji ASR uważano, że kruszywo reagując zwiększa swoją objętość, co prowadzi do ekspansji betonu.

Obecnie decydujące znaczenie w procesach ekspansji alkalicznej przypisuje się powstawaniu ekspansywnych produktów reakcji ASR, tj. żelu krzemianów sodu i potasu z udziałem jonów wapnia. Na przebieg niszczącej wewnętrznej korozji alkalicznej, jako wynik reakcji ASR mogą wpływać i powinny być analizowane czynniki zewnętrzne, odnoszone do środowiskowych klas ekspozycji, szczególnie znakozmiennej temperatury z oddziaływaniem środków odladzających [1-6].

Wyróżnikiem kruszyw mineralnych wykazujących skłonność do reagowania z wodorotlenkami NaOH i KOH w betonie jest przede wszystkim obecność krzemionki w formie amorficznej; opalu, trydymitu, krystobalitu, kwaśnego szkła wulkanicznego, chalcedonu i kwarcu krypto-krystalicznego. Reaktywność może wykazywać również kwarc w stanie naprężeń w skałach metamorficznych. Zawartość reaktywnej krzemionki decyduje o wartości ekspansji betonu [1-6]. Taka zależność jest wykorzystywana w szybkich metodach oceny potencjalnej reaktywności kruszywa; metoda petrograficzna ASTM C 295-12 [7] oznaczanie reaktywnych form krzemionki w kruszywie oraz metoda chemiczna ASTM C289-07 [8] pomiar zawartości rozpuszczalnej krzemionki. Opisując mechanizm reakcji ASR, wielkość ekspansji betonu z reaktywnym kruszywem przypisuje się powstawaniu reaktywnych produktów reakcji ASR. Rozpoznanie podstawowych mechanizmów destrukcji betonu spowodowanych ekspansyjnymi właściwościami produktów reakcji ASR pozwoliło na opracowanie metod badawczych stosowanych w celu badania reaktywności kruszyw, opartych na pomiarach ekspansji zapraw i betonów. Są to metoda przyśpieszona pomiarów ekspansji zapraw zgodnie z normą ASTM C 1260 [9] oraz długoterminowa metoda pomiaru ekspansji próbek betonu zgodnie z ASTM C 1293 [10]. Ocenę zjawiska występowania symptomów reakcji ASR w betonie uwzględnia również metoda obserwacji mikroskopowych produktów reakcji.

W normie betonowej PN-EN 206+A1:2016-12 [11] brakuje jednoznacznych kryteriów reaktywności w projektowaniu i wykonawstwie betonów odpornych na reakcję ASR. Według tej normy, w przypadku gdy kruszywo zawiera odmiany krzemionki podatne na reakcje z NaOH i KOH pochodzących z cementu, a beton narażony jest na działanie środowiska wilgotnego, należy podjąć działania w celu zapobiegania szkodliwej reakcji alkalia - krzemionka, stosując postępowanie o sprawdzonej przydatności. Odpowiednio badania i ocena reaktywności kruszyw są podstawowym problemem projektowania trwałych betonów cementowych, dla zakładanego okresu eksploatacji obiektu i oddziaływań środowiska; znakozmienne temperatury, wahania wilgotności, obciążenia i stosowanie środków odladzających dla nawierzchni betonowych i obiektów infrastruktury drogowej. W chwili obecnej, w kraju praktycznie nie funkcjonuje prawidłowy system oceny reaktywności alkalicznej kruszyw. W normie PN-EN 12620+A1:2010 [12] podane są wymagania odnoszące się do wycofanej normy badania ekspansji zapraw oraz wymagania określające ubytek masy kruszywa w roztworze NaOH. Metodyka obydwu procedur jest kwestionowana i normy te są wycofane w systemie norm ASTM i RILIEM [13]. Do oceny reaktywności kruszyw w tych systemach wskazane są wstępne badania petrograficzne oraz bezpośrednie metody pomiarów ekspansji alkalicznej prowadzone dla zapraw, wg przyspieszonej metody ASTM C 1260 [9] i wg metody długoterminowej pomiarów ekspansji betonów ASTM C 1293 [10].

Określając przydatność kruszywa do betonowych elementów konstrukcji należy uwzględniać warunki eksploatacyjne środowiska, takie jak: zmiany wilgotności i temperatury, środki odladzające i zmienne obciążenia mechaniczne. W tabeli 1 przedstawiono kategorie obciążeń agresywnego działania środowiska na beton oraz obciążeń mechanicznych betonu w okresie eksploatacji wg Raportu technicznego CEN/TR 16349 [14].

Tabela 1. Kategorie środowiska z uwagi na ryzyko reakcji ASR w betonie zgodnie z CEN/TR 16349 [14].

Opis środowiska		Warunki ryzyka reakcji ASR z uwagi na działanie środowiska
E1	Środowisko suche, chronione przed wilgocią zewnętrzną	• beton wewnętrzny w budynkach, w suchym środowisku operacyjnym • okres eksploatacji < 5 lat
E2	Środowisko wilgotne bez oddziaływania agresywnego czynników zewnętrznych	• beton wewnętrzny w budynkach o wysokiej wilgotności; tj. pralnie, zbiorniki, baseny pływackie • beton wystawiony na działanie wilgoci z powietrza, nieagresywnych wód podziemnych, zanurzony w wodzie słodkiej lub stale zanurzony w wodzie morskiej • okres eksploatacji < 45 lat
E3	Środowisko wilgotne z agresywnym oddziaływaniem czynników zewnętrznych	• beton wystawiony na działanie soli rozmrażających • beton wystawiony na działanie wody morskiej (zanurzanie i suszenie) lub słony oprysk • wilgotny beton wystawiony na naprzemienne działanie zamarzania i rozmarzania • wilgotny beton wystawiony na długotrwałe działanie wysokich temperatur • betonowe jezdnie poddane nierównomiernemu obciążeniu • okres eksploatacji > 75 lat

W przypadku kruszyw reaktywnych, zawierających składniki szkodliwe, głównie w formie reaktywnej krzemionki, możliwości zapobiegania reakcji ASR w betonie stwarza stosowanie cementów o niskiej zawartości KOH i NaOH, kształtujących niską alkaliczność cieczy porowej betonu oraz stosowanie dodatków mineralnych pucolanowych i hydraulicznych (SCM) [15-19].

Zgodnie z założeniami i programem projektu badawczego ASR-RID „Reaktywność alkaliczna krajowych kruszyw" [20] realizowane prace związane z zapobieganiem reakcji ASR w betonie dotyczą szerokiej grupy kruszyw z obszaru całego kraju. Badania wykazały, że większość kruszyw uzyskanych z przekruszenia skał piaskowo-żwirowych, grysów kruszyw polodowcowych i pochodzenia rzecznego jest umiarkowanie reaktywna. Odpowiednio dla tej grupy kruszyw realizowany jest obszerny program zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie. W pracy stosowane były cementy portlandzkie CEM I i cementy wieloskładnikowe z ustalonym dodatkiem popiołu lotnego lub granulowanego żużla wielkopiecowego. Wyniki pomiarów potwierdziły skuteczność dodatków pucolanowo-hydraulicznych popiołu i żużla na obniżenie wartości ekspansji zapraw. Stopień redukcji eks-

pansji zależy od ilości dodatku. Badania pozwoliły na określenie ilości dodatku mineralnego, popiołu lub żużla, które pozwalają na ograniczenie wartości ekspansji do poziomu poniżej 0,1% dla zaprawy wg normy ASTM C 1260 [9] stosując kruszywa reaktywne, stanowiące większość eksploatowanych w kraju z przekruszonych skał okruchowych. Program badań zapobiegania reakcji ASR został ukierunkowany na kruszywa o umiarkowanej reaktywności R1 i poziom ryzyka E3, odpowiadający oddziaływaniu środowiska wilgotnego z agresywnym oddziaływaniem czynników zewnętrznych, według Raportu Technicznego CEN/TR 16349 [14]

2. ZAKRES I METODY BADAŃ

Zgodnie programem Projektu ASR-RID [20] realizowane prace związane są z zapobieganiem reakcji ASR w betonie i dotyczą szerokiej grupy kruszyw wytypowanych na podstawie badań. Badania te wykazały, że większość kruszyw uzyskanych z przekruszenia kruszyw skał okruchowych polodowcowych i pochodzenia rzecznego wykazuje umiarkowany stopień reaktywności R1 (tab.2). Odpowiednio dla tej grupy kruszyw realizowany jest obszerny program zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie z kruszywem R1 poprzez stosowanie dodatków mineralnych (SCM). Prowadzone są badania pomiaru ekspansji zapraw i betonu z wykorzystaniem dodatków pucolanowo-hydraulicznych SCM: popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopiecowego. Do pomiarów ekspansji zapraw stosowana jest przyspieszona metoda wg ASTM C 1260 [9]. Do pomiarów ekspansji betonów stosowana jest metoda długoterminowa wg ASTM C1293 [10]. Wg zaleceń systemu AASHTO [21] i RILIEM [13] postęp reakcji ASR badano analizując produkty reakcji ASR, pod kątem zawartości ekspansywnego żelu krzemionkowo-sodowo-wapniowego, wykorzystując elektronową mikroskopię skaningową SEM/EDS. Obserwacje mikrostruktury zapraw prowadzono na zgładach zapraw po badaniach ekspansji alkalicznej wg metody ASTM C 1260 [9]. Analizę pierwiastkową EDS wykonano w mikroobszarach z zastosowaniem detektora SDD Apollo X firmy EDAX.

3. MATERIAŁY DO BADAŃ

Ocenę reaktywności kruszyw oraz efektywność zapobiegania (redukcji) reakcji ASR poprzez dodatek mineralny SCM stanowiły kryteria z wytycznych AASHTO R 80-17 [21] podane w tabeli 2. Uwzględniano warunki zastosowania naturalnego kruszywa do betonu dla poziomu ryzyka E1, E2 i E3, z uwagi na reaktywność kruszywa i całkowitą zawartości alkaliów w betonie – tabela 3.

Tabela 2. Kryteria oceny reaktywności kruszyw krzemionkowych z uwagi na wartość ekspansji zapraw i betonu oznaczonej wg metody przyspieszonej ASTM C 1260 [9] i ASTM C 1293 [10]

Stopień reaktywności kruszywa	Stopień reaktywności kruszywa	Ekspansja AMBT po 14 dniach według ASTM C1260 [%]	Ekspansja CPT po 1 roku wg ASTM C 1293 [%]
R0	Niereaktywne	≤0,10	≤0,04
R1	Umiarkowanie reaktywne	>0,10≤0,30	>0,04≤0,12
R2	Silnie reaktywne	>0,30≤0,45	>0,12≤0,24
R3	Bardzo silnie reaktywne	>0,45	>0,24

Tabela 3. Warunki zastosowania naturalnego kruszywa do betonu w zależności od poziomu ryzyka E, reaktywności kruszywa R i zawartości alkaliów (Na_2O_{eq}) w betonie.

Poziom ryzyka		Niereaktywne R0	Umiarkowanie reaktywne R1	Silnie reaktywne R2	Bardzo silnie reaktywne R3
		Zawartość Na_2O_{eq} na 1 m³ betonu			
Przydatność w środowisku	E1	bez ograniczeń	bez ograniczeń	bez ograniczeń	bez ograniczeń
	E2	maks. 3,0 kg/m³	maks. 2,4 kg/m³	Nie ma zastosowania	
	E3	maks. 3,0 kg/m³	maks. 1,8 kg/m³ + SCM kg/m³	Nie ma zastosowania	

Program badań realizowany był z uwzględnieniem grupy cementów handlowych; portlandzkiego CEM I bez składników nieklinkierowych oraz specjalnego, niskoalkalicznego cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/A-V NA zawierającego 18% popiołu lotnego krzemionkowego

Do badań modelowych wpływu ilości popiołu i żużla w cemencie na poziom ekspansji zapraw wg metody ASTM C1260 [9] stosowano cementy przygotowane w laboratorium. Cementy z udziałem popiołu uzyskano przez mieszanie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R z popiołem lotnym krzemionkowym o różnym stopniu miałkości: popiół N i popiół S, w ilości 15, 20 i 25%, odpowiadające cementom handlowym CEM II/A-V i CEM II/B-V. Popiół lotny krzemionkowy spełniał wymagania normy PN-EN 450-1 [22].

Cement żużlowy zawierający 30% i 50% żużla, odpowiadający cementom handlowym CEM II/B-S i CEM III/A [18], przygotowano poprzez mieszanie cementu CEM I 42,5R ze zmielonym granulowanym żużlem wielkopiecowym o uziarnieniu 3800 cm²/g i 6000 cm²/g wg Blaine'a.

Charakterystykę chemiczną materiałów zastosowanych do badań zestawiono w tabeli 4. Uwzględniając wymagania zawartości alkaliów, podane w tabeli 3 dla poszczególnych poziomów ryzyka i reaktywności kruszyw należy brać pod

uwagę bardzo niską wymywalność alkaliów z popiołu i żużla, nieprzekraczającą 3% (tab.5), co praktycznie nie ma istotnego wpływu na bilans zawartości alkaliów biorących udział w reakcji ASR. Przy obliczaniu zawartości alkaliów wprowadzanych z popiołem i żużlem do betonu, dla granicy bezpieczeństwa należy przyjmować, jak podają wytyczne zagraniczne [13,14,21,24-26], zdecydowanie wyższe poziomy wymywalności. W Projekcie wytycznych krajowych przyjęto wymywalność alkaliów 10% dla popiołu i żużla całkowitej zawartości alkaliów w tych dodatkach [27]. Wymywalność alkaliów z handlowych cementach portlandzkich CEM I wynosi przeciętnie 40-60% całkowitej zawartości Na_2O_{eq} w cemencie (tab.6). Przy obliczaniu bilansu zawartości alkaliów w betonie należy przyjmować 100% ilości alkaliów wprowadzanych z cementem, pomimo niższej dokumentowanej wymywalności. Wymywalność alkaliów z cementów i dodatków mineralnych oznaczono metodą ługowania wodą wg ASTM C114-15 [28].

Tabela 4. Skład chemiczny materiałów do badań reakcji ASR

Składnik	Materiał			
	CEM I 42,5N	CEM II/A-V 42,5 N NA	Popiół lotny krzemionkowy	Granulowany żużel wielkopiecowy
	Udział składnika [% masowy]			
Straty prażenia	3,70	2,33	2,63	+0,17
Faza szklista	-	-	-	98,6
SiO_2	20,16	26,25	51,37	38,40
Al_2O_3	4,33	8,68	27,80	7,77
Fe_2O_3	3,43	3,01	6,55	0,99
CaO	64,07	54,21	2,97	43,69
MgO	0,88	1,23	2,51	5,77
SO_3	2,93	2,36	0,23	1,12
Na_2O	0,27	0,35	0,68	0,53
K_2O	0,54	0,92	3,54	0,54
P_2O_5	0,32	0,16	-	-
TiO_2	0,27	0,36	-	-
Mn_2O_3	0,06	0,06	-	-
SrO	0,17	0,04	-	-
ZnO	0,18	0,05	-	-
Na_2O_{eq} całkowite	0,60	0,96	3,01	0,88
Na_2O_{eq} wymywalne	0,34	0,22	0,03	0,01
NR – Cz. nierozpuszczalne	-	14,0	79,8	-
Zawartość popiołu w cemencie CEM II/A-V 42,5N-NA równa się: NRx1,28 = 17,9%				

Tabela 5. Wymywalność alkaliów z dodatków mineralnych SCM stosowanych w programie badań RID

Opis próbki	Całkowita zawartość alkaliów [%]		Wymywalna zawartość alkaliów [%]	
Popiół lotny krzemionkowy kategorii N	Na_2O	0,86	Na_2O	0,04
	K_2O	3,21	K_2O	0,01
	Na_2O eq	2,97	Na_2O eq	0,05
Popiół lotny krzemionkowy kategorii S	Na_2O	0,60	Na_2O	0,05
	K_2O	2,60	K_2O	0,02
	Na_2O eq	2,31	Na_2O eq	0,06
Granulowany żużel wielkopiecowy, powierzchnia wł. 3800 cm^2/g	Na_2O	0,57	Na_2O	0,04
	K_2O	0,44	K_2O	0,00
	Na_2O eq	0,86	Na_2O eq	0,04
Granulowany żużel wielkopiecowy, powierzchnia wł. 6000cm^2/g	Na_2O	0,59	Na_2O	0,01
	K_2O	0,47	K_2O	0,00
	Na_2O eq	0,90	Na_2O eq	0,01

Tabela 6. Całkowita zawartość alkaliów i alkalia rozpuszczalne w krajowych cementach portlandzkich CEM I

Rodzaj cementu *	Zawartość alkaliów w cementach CEM I, % masy								
	Całkowita ** (total)			Alkalia rozpuszczalne *** (available)					
				Procent masy cementu %			Stopień wymywalności %		
	Na_2O	K_2O	Na_2O_{eq}	Na_2O	K_2O	Na_2O_{eq}	Na_2O	K_2O	Na_2O_{eq}
CEM I 42,5N LH/NA	0,19	0,47	0,50	0,04	0,35	0,27	21	75	54
CEM I 42,5N LH/NA	0,18	0,21	0,32	0,05	0,12	0,13	28	57	43
CEM I 42,5R	0,21	0,86	0,78	0,06	0,62	0,47	29	72	60
CEM I 42,5R	0,21	0,59	0,60	0,07	0,37	0,31	33	63	52
CEM I 42,5N	0,24	0,54	0,57	0,05	0,54	0,41	29	63	55
CEM I 52,5R NA	0,34	0,29	0,53	0,05	0,10	0,12	15	34	23
CEM I 42,5N LH/SR3/ NA	0,26	0,38	0,51	0,04	0,21	0,18	15	55	35

Do badań zapobiegania reakcji ASR stosowano wybrane próbki przekruszonych kruszyw polodowcowych oraz ze skał litych. Badania skoncentrowano na kruszywach umiarkowanie reaktywnych R1 o wartości ekspansji wg ASTM C 1260 [9] w granicach 0,1-0,3%. Dla wszystkich zbadanych kruszyw ilość alkaliów wymywalnych była bardzo niska w przedziale 0,00-0,03 % masy i nie jest praktycznie wliczana do bilansu zawartości alkaliów, biorących udział w reakcji ASR.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1 Wpływ popiołu na ekspansję zapraw wg metody ASTM C1260 [9] dla cementów handlowych.

Pomiary ekspansji zapraw wg metody ASTM C 1260 [9] przekruszonych kruszyw ze skał okruchowych, głównie polodowcowych, przy stosowaniu cementu portlandzkiego CEM I 42,5N oraz cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/A-V 42,5N-NA zawierającego 18% popiołu lotnego krzemionkowego zestawiono w tabeli 7 oraz przedstawiono na rysunku 1.

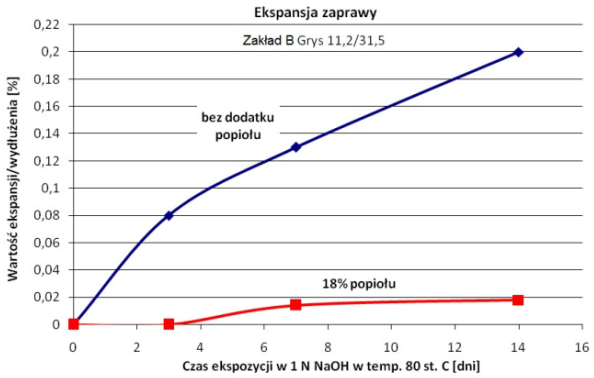
Dane zebrane w tabeli 7 potwierdzają zróżnicowaną reaktywność przekruszonych krajowych kruszyw okruchowych. Zakres wahań reaktywności kruszyw pomiędzy Zakładami wynosi od wartości bliskiej 0,1%, tj. granicznej dla kruszywa niereaktywnego R1, poprzez największą grupę kruszyw umiarkowanie reaktywnych R1 o ekspansji >0,1% ≤0,3%. Niewielką populację stanowią kruszywa silnie reaktywne R2 i bardzo silnie reaktywne R3 o ekspansji odpowiednio ≥0,3% i ≥0,4%. Zebrane w tabeli 7 pomiary ekspansji zapraw z kruszyw umiarkowanie reaktywnych potwierdzają dużą efektywność dodatku mineralnego popiołu lotnego krzemionkowego. W każdym przypadku kruszywa R1, przy stosowaniu cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/A-V zawierającego 18% popiołu lotnego uzyskuje się redukcję ekspansji do wartości <0,1% po upływie 14 dni wg metody ASTM C 1260 [9].

Tabela 7. Wpływ popiołu lotnego krzemionkowego na wartość ekspansji zapraw z kruszywa polodowcowego (grysów).

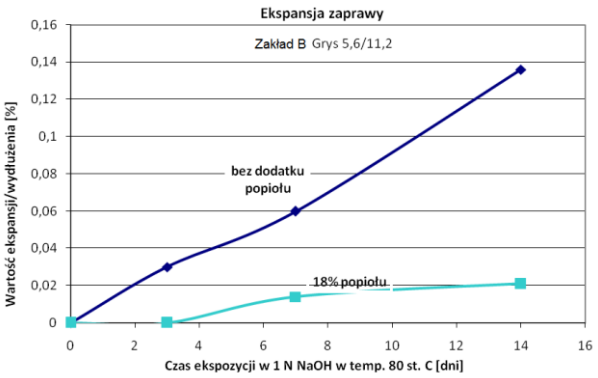
Kruszywo		Cement	Ekspansja zaprawy po upływie 14 dni [%]
Zakład A	Grys 8/16	CEM I 42,5 R	0,096
		CEM II/A-V	0,045
Zakład B	Grys 11,2/31,5	CEM I 42,5 R	0,20
		CEM II/A-V	0,018
	Grys 5,6/11,2	CEM I 42,5 R	0,136
		CEM II/A-V	0,021
	Grys 2/5,6	CEM I 42,5 R	0,136
		CEM II/A-V	0,060
Zakład C	Grys 2/5,6	CEM I 42,5 R	0,08
		CEM II/A-V	0,065

Zakład D	Grys 11,2/16	CEM I 42,5 R	0,172
		CEM II/A-V	0,076
	Grys 4/8	CEM I 42,5 R	0,209
		CEM II/A-V	0,095
Zakład E	Grys 2/5,6	CEM I 42,5 R	0,162
		CEM II/A-V	0,014
Zakład F	Kwarcyt 2/5,6	CEM I 42,5 R	0,284
		CEM II/A-V	0,106
Zakład G	Grys 8/11,2	CEM I 42,5 R	0,218
		CEM II/A-V	0,081
Zakład H	Grys 8/12,5	CEM I 42,5 R	0,382
		CEM II/A-V	0,078

A



B



Rys. 1. *Ekspansja zapraw wg ASTM C 1260 [9] z cementem CEM I 42,5N bez dodatku popiołu (kolor niebieski) i z cementem CEM II/A-V 42,5N-NA z dodatkiem 18% popiołu (kolor czerwony) z przekruszonym kruszywem polodowcowym z Zakładu B o różnym uziarnieniu: A) grys 11,2/31,5 i B) grys 5,6/11,2;*

4.2 Badania modelowe wpływu popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopiecowego na ograniczenie reakcji ASR

Badania modelowe wpływu popiołu lotnego krzemionkowego na ograniczenie reakcji ASR i ekspansji alkalicznej przedstawiono w tabeli 8 i 9. W tabeli 8 zestawiono ekspansję zapraw z dodatkiem 15, 20, 25% popiołu kategorii N oraz wartość ekspansji wyznaczoną dla zaprawy z dodatkiem 20% popiołu kategorii S o znacznie większym rozdrobnieniu. W tabeli 9 zestawiono ekspansję zapraw z dodatkiem 30 i 50% żużla o powierzchni właściwej 3800 i 6000 cm^2/g. Na rysunku 2 dla kruszywa z Zakładu E o umiarkowanej reaktywności R1 przedstawiono wielkość ekspansji zaprawy w funkcji zawartości żużla.

Przeprowadzone badania modelowe pozwalają ustalić dodatek popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopiecowego skutecznie ograniczających reakcję ASR w betonie i zaprawie. Może to być dla kruszywa R1 o ekspansji 0,1-0,2% dodatek popiołu wprowadzany z cementem portlandzkim popiołowym CEM II/A-V 42,5N, zawierającym minimum 18% popiołu. Dla kruszyw R1 o ekspansji 0,2-0,3% należy stosować cement CEM II/B-V 42,5N zawierający min.imum 25% popiołu.

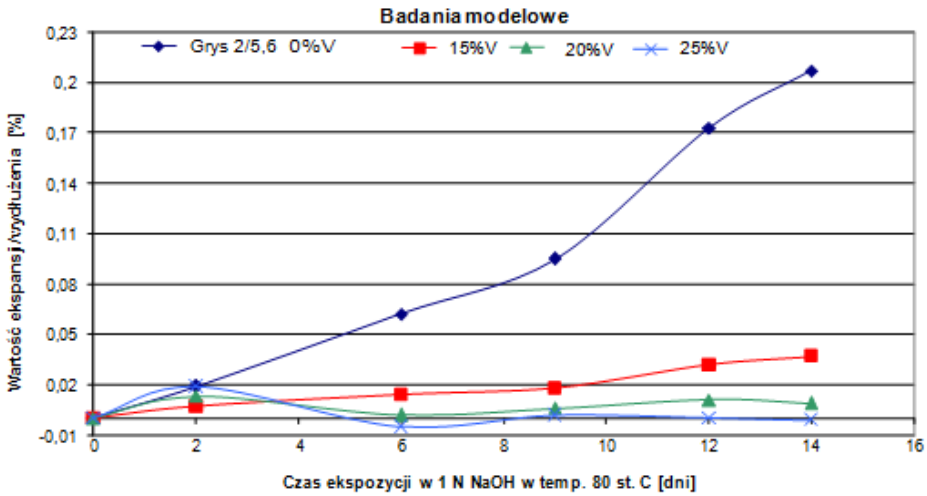
W przypadku żużla minimalna ilość dodatku dla kruszywa R1 o ekspansji 0,1-0,2% powinna wynosić 30% z cementu portlandzkiego żużlowego CEM II/B-S 42,5N, a dla kruszywa R1 o ekspansji 0,2-0,3% należy stosować cement CEM III/A zawierający minimum 50% żużla.

Tabela 8. Ekspansja wg ASTM C 1260 [9], zapraw z cementu CEM I 42,5N z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego kategorii N i S

Producent	Opis kruszywa	Ilość dodatku popiołu kategorii N i S, % masy cementu									
		0 %		15% kat. N		20% kat. N		25% kat. N		20% kat. S	
		Wartość ekspansji po dniach, %									
		14	28	14	28	14	28	14	28	14	28
Zakład A	Grys 2/8	0,08	0,13	0,07	0,15	0,05	0,10	0,03	0,08	0,02	0,02
Zakład E	Grys 2/5,6	0,21	0,39	0,06	0,12	0,03	0,08	0,01	0,05	0,01	0,02

Tabela 9. Ekspansja wg ASTM C 1260 [9], zapraw z cementów CEM I 42,5N z dodatkiem granulowanego żużla wielkopiecowego o powierzchni właściwej 3800 i 6000 cm²/g wg Blaine'a

Producent	Opis kruszywa	Ilość dodatku żużla o różnym rozdrobnieniu, % masy cementu									
		0 %		30% S=3800		30% S=6000		50% S=3800		50% S=6000	
		Wartość ekspansji po dniach, %									
		14	28	14	28	14	28	14	28	14	28
Zakład A	Grys 2/8	0,08	0,13	0,06	0,15	0,03	0,09	0,04	0,07	0,03	0,05
Zakład E	Grys 2/5,6	0,21	0,39	0,05	0,13	0,04	0,08	0,02	0,05	0,02	0,04

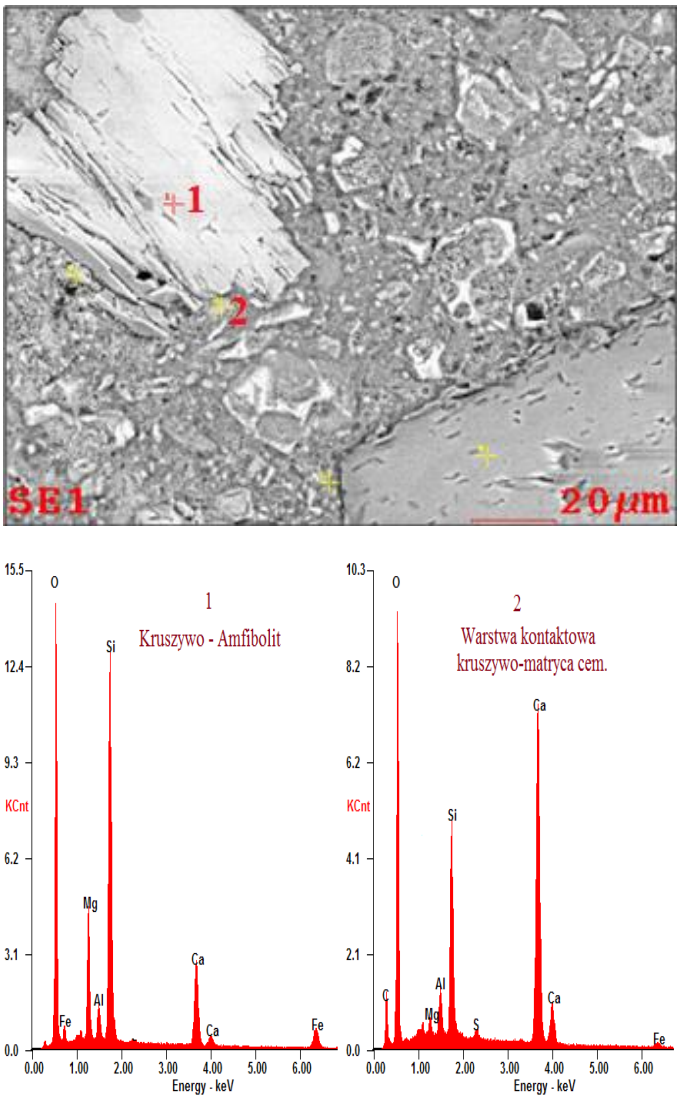


Rys. 2. Wpływ ilości dodatku popiołu lotnego krzemionkowego na wartość ekspansji zapraw wg ASTM C 1260 [9] z kruszywem umiarkowanie reaktywnym R1 z Zakładu E.

4.3 Badania SEM/EDS mikrostruktury i składu chemicznego w mikroobszarach produktów hydratacji zapraw po badaniach ekspansji ASR wg ASTM C 1260 [9].

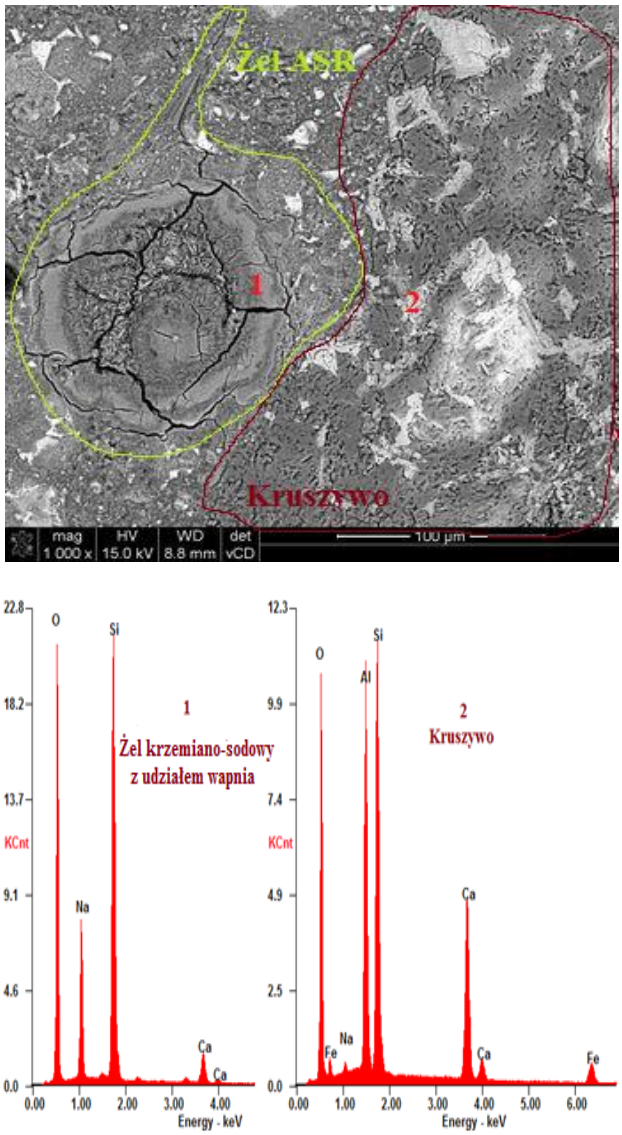
Wyniki obserwacji SEM z analizą w mikroobszarach EDS próbki zaprawy z niereaktywnym kruszywem R0 (Rys. 3) porównano z obserwacjami próbek zapraw z kruszywem umiarkowanie reaktywnym R1 (Rys. 4) i kruszywem silnie

reaktywnym R2 (Rys. 5). Rysunki 3-5 przedstawiają mikrostrukturę i skład chemiczny w mikroobszarach próbek zapraw z w/w kruszywami z cementem portlandzkim CEM I bez dodatków mineralnych. Na rysunku 6 zamieszczono obserwacje próbki zaprawy z kruszywem umiarkowanie reaktywnym R1 i z cementem CEM II/A-V 42,5 N z dodatkiem 18% popiołu lotnego krzemionkowego. Wszystkie obserwowane próbki zapraw były po badaniach ekspansji ASR wg ASTM C 1260 [9].



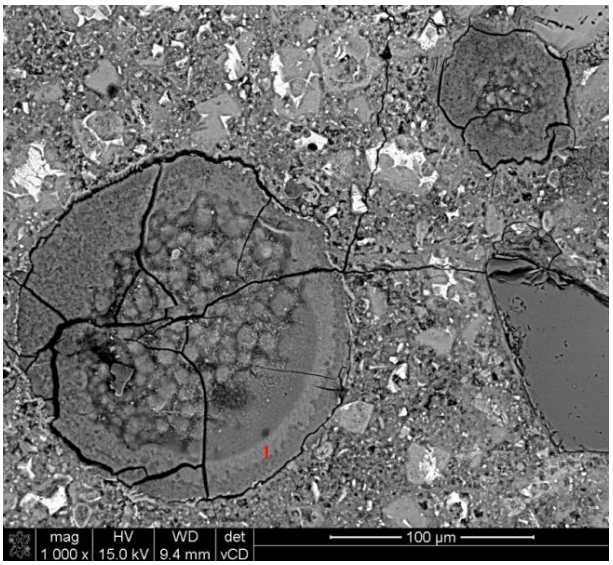
Rys. 3. Produkty hydratacji zaprawy z niereaktywnym kruszywem R0 i cementem CEM I bez dodatku mineralnego.

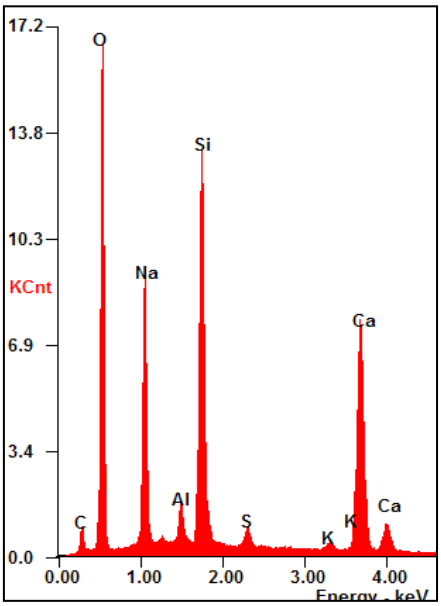
Ekspansja zaprawy z kruszywa niereaktywnego R0 wyniosła 0,009% po 14 dniach ekspozycji w roztworze NaOH. W produktach hydratacji nie stwierdzono oznak reaktywności alkalicznej. Kruszywo stanowi krzemian magnezowo-wapniowy z wtrąceniami kwarcu i biotytu. Warstwę kontaktową stanowi faza C-S-H. Zwraca uwagę poprawna strefa kontaktowa kruszywo-matryca cementowa, szczelna struktura, brak makroporów i spękań (Rys.3).



Rys. 4. Produkty hydratacji zaprawy z umiarkowanie reaktywnym kruszywem polodowcowym R1 i cementem CEM I bez dodatku mineralnego

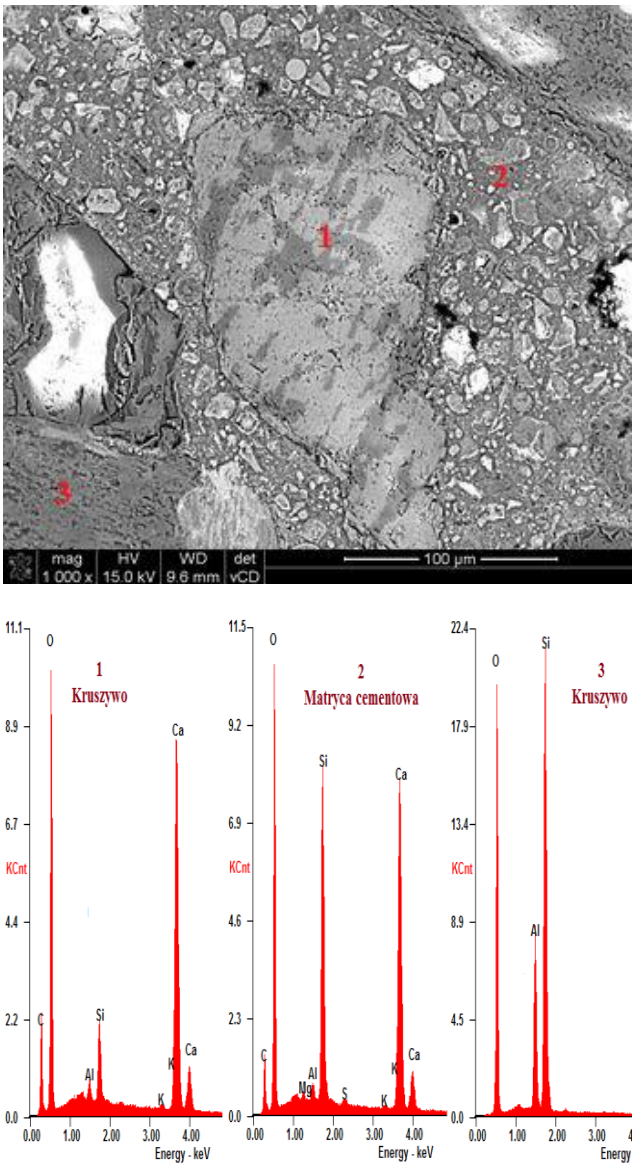
W próbce kruszywa umiarkowanie reaktywnego R1 o ekspansji 0,135%, identyfikuje się wyraźne oznaki destrukcyjnego oddziaływania ekspansywnego żelu krzemiano-sodowego z udziałem wapnia (pkt.1). Przy stosunkowo szczelnej strukturze pojawiają się obszary spękań matrycy i kruszywa.





Rys. 5. Produkty hydratacji zaprawy z silnie reaktywnym kruszywem polodowcowym R2 i cementem CEM I bez dodatku mineralnego.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki analizy SEM kruszywa silnie reaktywnego R2 o wartości ekspansji 0,382%. Mikrofotografia SEM i analiza EDS przedstawia liczne obszary destrukcji zaprawy w wyniku powstawania pęczniejącego żelu, który tworzy sferyczne koncentracje działające niszcząco na matrycę i kruszywo.



Rys. 6. Produkty hydratacji zaprawy z umiarkowanie reaktywnym kruszywem polodowcowym R1 i cementem CEM II/A-V z 18% dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego.

Ekspansja zaprawy z kruszywem umiarkowanie reaktywnym R1 i cementem portlandzkim popiołowym CEM II/A-V 42,5R NA z poziomu 0,135% obniża się do poziomu 0,02%, tj. sześciokrotnie niższego od zaprawy z tym samym kruszywem i cementem portlandzkim CEM I bez dodatku popiołu (Rys.6, Tab.7). Analiza SEM/EDS nie wykazuje oznak destrukcji zaprawy w wyniku reakcji ASR. Nie identyfikuje się pęczniejącego żelu krzemiano-sodowo wapniowego. W przypadku zapraw z cementem bez dodatku popiołu tworząca się faza C-S-H wykazuje wysoki stosunek C/S 1,8-2, a dla zapraw z kruszywem umiarkowanie reaktywnym i cementem z dodatkiem popiołu stosunek ten jest wyraźnie niższy i wynosi 1-1,4. Dane literaturowe dowodzą, że taka zmiana proporcji C/S prowadzi do szczelniejszej struktury i ograniczenia dyfuzji sodu w hydratach zaczynu cementowego [29].

5. WNIOSKI Z BADAŃ

Wyniki pomiarów ekspansji alkalicznej zapraw wg metody ASTM C 1260 [9] prowadzone w ramach Projektu ASR-RID wykazują możliwość skutecznego zapobiegania destrukcji konstrukcji betonowych w wyniku reakcji ASR poprzez stosowanie popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopiecowego w składzie betonu.

Badania pozwoliły na określenie ilości aktywnych dodatków mineralnych popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopiecowego, wprowadzanych do betonu z cementem wieloskładnikowym, gwarantujących pełną odporność betonu na reakcję ASR, dla grup ryzyka E2 i E3.

Badania SEM potwierdzają reaktywność alkaliczną przekruszonych kruszyw ze skał okruchowych, z uwagi na obecność żelu krzemianu-sodowego z udziałem wapnia. Wyniki badań potwierdzają korzystny wpływ popiołu na zmniejszenie ekspansji, z uwagi na bardzo niską ilość pęczniejącego żelu; produktu reakcji ASR prowadzącego do destrukcji betonu. Korzystny efekt popiołu na reakcję alkaliczną ASR badania SEM tłumaczą powstawaniem zmodyfikowanej fazy C-S-H o niskim stosunku Ca/Si, doszczelniającej mikrostrukturę betonu.

PODZIĘKOWANIA

Referat przygotowano w ramach Projektu RID „Reaktywność alkaliczna krajowych kruszyw" (nr DZP/RID-1-37/6NCBR/2016), finansowanego przez GDDKiA oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

[1] Katayama T., The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) — Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR, Cement and Concrete Res, Vol. 40, 4, 2010, 643-675

[2] Ulm, F., Coussy, O., Kefei, L., Larive, C., 2000, Thermo-Chemo-Mechanics of ASR Expansion in Concrete Structures, Journal of Engineering Mechanics, V. 126, No. 3, 233-242

[3] Kawamura M, Iwahori K., ASR gel composition and expansive pressure in mortars under restraint, Cement Concrete Comp 2004; 26 (1), 47–56

[4] Diamond S. A review of alkali–silica reaction and expansion mechanisms. Reactive aggregates. Cement and Concrete Res 1976, 6, 549–60

[5] Thomas MDA., The effect of supplementary cementing materials on alkali–silica reaction: a review. Cement and Concrete Res 2011, 41, 209–16

[6] Lindgard J, Andic-Cakır O, Fernandes I, Ronning TF, Thomas MDA. Alkali–silica reactions (ASR): literature review on parameters influencing laboratory performance testing. Cement and Concrete Res 2012, 42, 223–43

[7] ASTM C 295-12: Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete

[8] ASTM C 289-07: Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)

[9] ASTM C 1260 -14 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar - Bar Method)

[10] ASTM C 1293-08b (2015) Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction

[11] PN-EN 206+A1:2016-12. Beton -- Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność

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

[13] RILIEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, vol. 17, Springer Netherlands, 2016

[14] CEN/TR 16349 Framework for a specification on the avoidance of a damaging Alkali-Silica Reaction (ASR) in concrete

[15] Benoit Fournier, Raymond Chevrier, Alain Bilodeau, Pierre-Claver Nkinamubanzi, Nabil Bouzoubaa. Comperative field and laboratory investigations on the use of supplementary cementing materials (SCMS) to control alkali-silica reaction (ASR) in concreto. 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Sao Paulo-Brasil, 2016

[16] Kazuyuki Torii, Tetsuji Kubo, Chikao Sannoh, Maki Kanitani. The alkali-silica reactivity of andesitic river aggregates and ASR mitigation effect by using fine fly ash. 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Sao Paulo-Brasil, 2016

[17] João Custódio, Felipe Río Iglesias, Óscar Herrero Domínguez, António Santos Silva, António Bettencourt Ribeiro, Dória Costa Fly ash to prevent ASR with slowly-reactive aggregates in Portugal. 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Sao Paulo-Brasil, 2016

[18] Medhat Shehata, Steven Jagdat, mohamed Lachemi, Chris Rogers. Alkali-carbonate reaction: Mechanism and effects of cement alkali and supplementary cementing materials. 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Sao Paulo-Brasil, 2016
[19] Shigenobu Iguchi, Yoshinori Matsuda, Daisuke Tsukishima. An examination of AAR mitigation measures using fly ash. 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Sao Paulo-Brasil, 2016
[20] Projekt badawczy realizowany w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia RID „Rozwój Innowacji Drogowych" w obszarze zagadnienia. pt.: „Reaktywność alkaliczna krajowych kruszyw". Projekt realizowany w ramach konsorcjum: Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN. finansowany przez: Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad w latach 2016–2018
[21] AASHTO R 80-17 "Standard Practice for Determining the Reactivity of Concrete Aggregates and Selecting Appropriate Measures for Preventing Deleterious Expansion in New Concrete Construction", American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, DC, 2011
[22] PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu - Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
[23] PN-EN 197-1:2012 PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
[24] DAfStB - Richtlinie, orbeugen de Maßnahmen gegen schädigen de Alkali reaction im Beton (Alkali-Richtlinie), BeuthVerlag, Berlin, 43 str., Ausgabe October 2013
[25] ÖNORM B 3100:2006-07, Beurteilung der Alkali- Kieselsäure - Reaktivität im Beton, Österreichisches Normungs Institut, Wien 2008
[26] STN 72 1179, Stanovenie a hodnotenie alkalickej rozpínavos tikameniva (alkalicko-kremičitáreakcia), Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, 2014
[27] Projekt wytycznych technicznych GDDKiA- Zapobiegania reakcji alkalicznej kruszywa w betonie nawierzchni drogowych i infrastruktury drogowej w tym dróg szybkiego ruchu i autostrad, 2018
[28] ASTM C114-15 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement
[29] Ostrowski M. Rola popiołu lotnego i granulowanego żużla wielkopiecowego w kształtowaniu właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu o niskiej zawartości klinkieru portlandzkiego. Praca doktorska na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej, 2017 r.

SILICEOUS FLY ASH AS AN ADDITIVE TO PROVIDE PROTECTION AGAINST ASR CORROSION OF CONCRETE

ABSTRACT

The effectiveness of preventing the reaction of ASR (alkalis-reaction) in concrete can be shaped by using a non-reactive aggregate, providing a low content of alkali: sodium and potassium in a concrete mix, the use of low alkaline cements shaping the low alkalinity of the pore concrete liquid, or the use of mineral additives.

This paper presents the results of research to prevent the reaction of ASR in concrete by the use of pozzolan-hydraulic mineral additives. The research program for aggregates obtained as part of the RID project "Alkaline reactivity of domestic aggregates" included the use of CEM I Portland cement without additives and special low-alkaline multi-component cements with the addition of siliceous fly ash and granulated blast furnace slag. The scope of the research included a large group of domestic aggregates with different levels of alkaline reactivity.

The advanced program of measurements of mortar alkalinity expansion, according to the accelerated method ASTM C 1260-14, showed the possibility of effective prevention of ASR destruction of concrete with reactive aggregates, when using multicomponent cements with a sufficiently high content of siliceous fly ash and / or granulated slag.