

Kinga DZIEDZIC

mgr inż., Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Dominik NOWICKI

mgr inż., Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Michał A. GLINICKI

prof. dr hab. inż., Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Reaktywność alkaliczna mieszaniny kruszywa grubego łamanego i piasku w betonie

Alkaline reactivity of blends of crushed coarse aggregate and sand in concrete

Streszczenie

Dobór kruszyw mineralnych pod kątem odporności na wystąpienie szkodliwej reakcji alkalia-kruszywo jest jednym ze znanych wymagań stawianych przy projektowaniu betonu trwałego w środowisku wilgotnym, ewentualnie narażonego na oddziaływanie soli odladzających. Znaczenie reaktywności alkalicznej kruszywa drobnego (piasku naturalnego) wzbudza niekiedy kontrowersje. Przeprowadzono badania doświadczalne reaktywności alkalicznej mieszaniny kruszyw o zróżnicowanym składzie mineralnym – grysów szarogłazowych i amfibolitowych z piaskiem naturalnym z różnych kopalń. Do oceny reaktywności kruszyw wykorzystano metodę „Miniature Concrete Prism Test” (MCPT) polegającą na oznaczaniu ekspansji próbek betonu w roztworze NaOH w temperaturze 60°C w okresie do 84 dni. Wyniki badań wykazały znaczny wpływ reaktywności piasku na ekspansję betonu oraz na resztkową wytrzymałość betonu na ściskanie. Wykazano korelację zmierzonej ekspansji próbek z obniżeniem dynamicznego modułu sprężystości betonu. Z uwagi na rozsądnie niedługi czas badania i brak konieczności rozdrabniania kruszywa metoda MCPT okazała się praktyczną alternatywą dla innych metod określania reaktywności alkalicznej kruszywa, oferując jednocześnie możliwość oceny praktycznego stosu okruszowego.

Abstract

The selection of mineral aggregates with regard to their resistance to harmful alkali-aggregate reaction is one of the established requirements in the design of durable concrete intended for use in humid environments or potentially exposed to de-icing salts. The significance of the alkali reactivity of fine aggregate (natural sand) is sometimes a subject of debate. Experimental studies were conducted on the alkali reactivity of aggregate mixtures with varied mineral compositions-greywacke and amphibolite crushed stones with natural sand from different quarries. To assess aggregate reactivity, the „Miniature Concrete Prism Test” (MCPT) method was used. This method involves measuring the expansion of concrete specimens immersed in a NaOH solution at 60°C

over 84 days. The results showed a significant influence of sand reactivity on concrete expansion and residual compressive strength of the concrete. A correlation was demonstrated between the measured expansion of specimens and the reduction in the dynamic modulus of elasticity of concrete. Given the relatively short testing time and the fact that the method does not require aggregate crushing, the MCPT proved to be a practical alternative to other methods of assessing aggregate alkali reactivity, while also enabling the evaluation of the practical aggregate gradation stack.

1. Wprowadzenie

Projektowanie składu betonu na trwałość w warunkach eksploatacji konstrukcji inżynierskich wymaga selekcji składników z uwzględnieniem stabilności ich właściwości w środowiskach agresywnych. Kruszywa mineralne w betonie cementowym stanowią na ogół składniki o niezmiennych właściwościach mechanicznych. Do wyjątków należą kruszywa zawierające reaktywne minerały krzemionkowe podatne na reakcję z wodorotlenkami sodu i potasu w cieczy porowej betonu cementowego, tzw. reakcję alkalia-krzemionka (ASR). Ich zastosowanie w betonie konstrukcyjnym może wywołać przedwczesne uszkodzenia w postaci spękań, delaminacji i pęcznienia elementów, przyczyniając się do zmniejszenia przydatności eksploatacyjnej konstrukcji [1-2].

Selekcję kruszyw niereaktywnych alkalicznie przeprowadza się głównie za pomocą analizy petrograficznej kruszywa i analizy potencjalnej ekspansji betonu w warunkach przyspieszających występowanie szkodliwych skutków reakcji ASR. Klasyfikację reaktywności alkalicznej kruszywa na ogół przeprowadza się osobno dla każdej frakcji kruszywa, zwłaszcza rozdzielając kruszywo grube i drobne. Zgodnie z zaleceniami normowymi, zidentyfikowana reaktywność jednej z frakcji kruszywa wymaga takiego samego traktowania całego stosu okruszowego i zastosowania odpowiednich środków zapobiegających uszkodzeniom wskutek ASR. Alternatywnie, należy wymienić reaktywną frakcję kruszywa na niereaktywną. Takie podejście nie wpisuje się w aktualne trendy zrównoważonego wykorzystania surowców mineralnych.

Rola reaktywności alkalicznej kruszywa drobnego wzbudza niekiedy kontrowersje. Z doniesień literaturowych wynika, że ekspansja wskutek ASR wzrasta wraz ze zmniejszaniem wielkości ziaren kruszywa z powodu zwiększonej powierzchni reaktywnych składników kruszywa. Stwierdzono jednak, że zależność ta nie jest monotoniczna w przypadku niektórych kruszyw mineralnych i największa ekspansja występuje dla pośredniej frakcji [3-4]. Ze względu na zależność reaktywności od wielkości ziarna, kruszywa powinny być klasyfikowane na podstawie badań takich frakcji, jakie zostaną użyte w betonie, bez ich rozdrabniania.

Na świecie i w Polsce do klasyfikacji podatności kruszyw na reakcję alkalia-krzemionka stosuje się przede wszystkim metodę przyspieszoną 14-dniową w 80°C (PB/1/18 [5]) oraz metodę roczną w 38°C (PB/2/18 [6]). Jednak obie metody mają swoje wady. Metoda przyspieszona wymaga rozdrobnienia kruszywa do 2 mm, więc miarodajna ocena reaktywności alkalicznej zmieszanych frakcji kruszywa jest utrudniona. Metoda roczna jest problematyczna ze względu na intensywne wyciekanie alkaliów [7] oraz mało praktyczny, długi czas badania. Unormowana w roku 2019 metoda Miniature Concrete Prism Test (MCPT) [8] ma eliminować wady powyższych metod przy dość krótkim czasie badania (8 tygodni), bez potrzeby rozdrabniania kruszywa grubego. W badaniach laboratoryjnych [9-10] metoda MCPT wykazała dobrą

zgodność z metodą roczną. Co jeszcze ważniejsze, wykazano lepszą zgodność tej metody z pomiarami skutków ASR na blokach betonowych ekspozycyjnych na oddziaływanie naturalnych warunków klimatycznych [11].

Celem badań jest ocena reaktywności alkalicznej mieszaniny kruszyw do betonu, złożonej z frakcji drobnej i grubej kruszyw o zróżnicowanym składzie mineralnym. Zakres badań obejmuje grube kruszywo łamane ze skały litej oraz naturalnie występujące kruszywa drobne (piaski). Obok metodyki PB/1/18 [5] do badań zastosowano metodykę MCPT, tj. procedurę badania ekspansji próbek betonu ekspozycyjnych na oddziaływanie roztworu 1 M NaOH w temperaturze 60°C.

2. Materiały i metody badawcze

Do badań użyto kruszywo grube łamane z szarogłazu (S) i amfibolitu (A), frakcji 2/8 i 8/16. Jako kruszywo drobne zastosowano naturalne piaski kwarcowe (B, W, T) i mieszaninę piasków naturalnych (X) o uziarnieniu do 2 mm. Selekcja piasku była uzasadniona zróżnicowaniem potencjalnej reaktywności alkalicznej (Tab.1). Do wykonania betonu zastosowano cement portlandzki CEM I 52.5 R o zawartości alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=0,88$. Skład chemiczny cementu przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 1. Charakterystyka kruszyw mineralnych.

Ozn.	Rodzaj kruszywa	Gęstość [g/cm ³]	Ekspansja oznaczona metodą przyspieszoną *) [%]	
			14 dni	28 dni
S	Grys szarogłazowy	2,71	0,31	0,52
A	Grys amfibolitowy	2,89	0,16	0,26
B	Naturalny piasek kopalny	2,65	0,09	0,23
W	Naturalny piasek rzeczny	2,66	0,30	0,46
T	Naturalny piasek kopalny	2,65	0,36	0,57
X	Mieszanina piasków (50% B+50% W)	2,66	0,16	0,32

*) wg PB/1/18 [5]

Tabela 2. Skład cementu zgodnie z PN-EN 196-2.

Rodzaj cementu	Składnik [%]								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
CEM I 52,5 R	19,42	5,45	2,94	64,10	1,75	3,50	0,24	0,97	1,03

Mieszanki betonowe zaprojektowano zgodnie z wymaganiami procedury MCPT [8], stosując ograniczenie uziarnienia kruszywa grubego do 12.5 mm. Stos okruszowy kruszywa skomponowano z odpowiednich frakcji gysu i piasku. Kruszywo drobne użyte zostało bez ingerencji w uziarnienie, a brakującą frakcję 2/4 mm uzupełniono frakcją 2/4 mm kruszywa grubego. Zawartość cementu była stała 420 kg/m³, współczynnik wodno-cementowy w/c wynosił 0,45; do wody zarobowej dodano wodorotlenku sodu w celu podwyższenia zawartości alkaliów do $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1,25\%$. Odstępstwem od procedury normowej było użycie mieszaniny kruszyw o zróżnicowanej reaktywności.

Z każdej mieszanki zaformowano próbki o wymiarach 50x50x285 mm z czopikami pomiarowymi. Próbki były zagęszczane na stole wibracyjnym i przechowywane w formach w warunkach wysokiej wilgotności (RH>95%) przez 24 h. Następnie próbki umieszczono w wodzie o temp. 60°C na 24 h, po czym zanurzono je w 1 molowym roztworze wodorotlenku sodu i przechowywano przez 84 dni. Próbkę referencyjną przechowywano w tym samym czasie w wodzie o temperaturze 20-22°.

Okresowo przeprowadzano pomiary wydłużenia próbek oraz pomiary rezonansowego modułu sprężystości betonu za pomocą urządzenia GrindoSonic MK5 z detektorem piezoelektrycznym, podobnie jak w przypadku [12-13]. Na zakończenie wykonano pomiar wytrzymałości na ściskanie na próbkach sześciennych o boku 50 mm wyciętych z belek betonowych.

3. Wyniki badań i dyskusja

W Tabeli 3 przedstawiono zestawienie wyników badań ekspansji oraz wyniki pomiarów wytrzymałości na ściskanie betonu po badaniach ekspansji oraz próbek referencyjnych przechowywanych w wodzie w 20°C. Podano wartości średnie z trzech próbek, przy czym rozrzut wyników nie przekraczał $\pm 11\%$.

Tabela 3. Zestawienie pomiarów ekspansji próbek betonowych i wytrzymałości na ściskanie.

Kruszywo grube	Rodzaj piasku	Ekspansja próbek w 1 M NaOH i 60°C [%]		Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po 84 dniach ekspozycji	
		56 dni	84 dni	NaOH 60°C	H ₂ O 20°C
Szarogłaz (S)	B	0,065	0,092	57,2	59,0
	W	0,093	0,119	64,3	73,1
	T	0,120	0,158	64,2	73,9
Amfibolit (A)	B	0,048	0,075	56,6	67,6
	X	0,069	0,115	55,5	63,8
	W	0,095	0,159	51,9	66,5

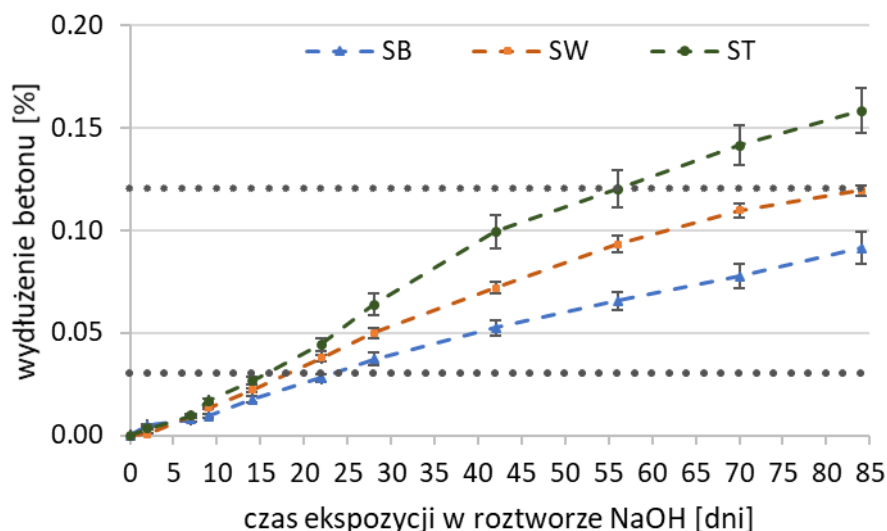
Na rysunku 1 przedstawiono wydłużenie próbek betonu w czasie przechowywania w 1 M roztworze wodorotlenku sodu w temperaturze 60°C. Kryteria oceny reaktywności alkalicznej kruszywa zgodnie z procedurą MCPT są następujące: wydłużenie próbek betonowych po 8 tygodniach ekspozycji, wynoszące do 0,03%; 0,03-0,12% i 0,12-0,24%, odpowiada kolejno kategorii kruszywa niereaktywnego, umiarkowanie reaktywnego i silnie reaktywnego. Odnosząc się do kryteriów normowych MCPT badane kruszywa grube nawet w zestawieniu z piaskiem niereaktywnym B kwalifikują się do kategorii kruszyw umiarkowanie reaktywnych. Jak stwierdzono, zastąpienie piasku B innym piaskiem naturalnym o większej potencjalnej reaktywności (Tabl.1) wywołuje wyraźne podwyższenie ekspansji betonu, sięgające do 110%.

Kruszywo szarogłazowe zostało rozpoznane w literaturze jako kruszywa potencjalnie reaktywne [14], za wyjątkiem złóż w Nowej Zelandii. Zasadniczym powodem ich reaktywności jest obecność takich minerałów reaktywnych jak kwarc mikrokrystaliczny i kryptokrystaliczny [15]. Zwłaszcza przy zewnętrznym

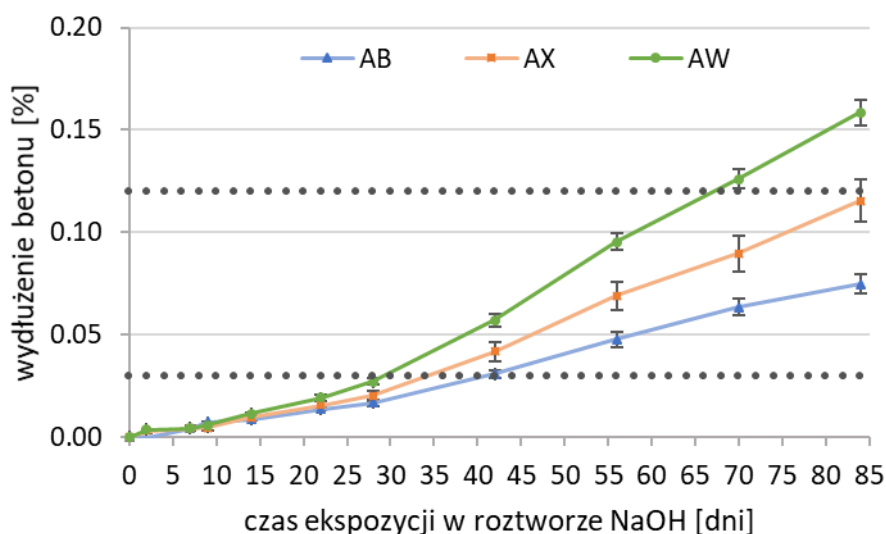
oddziaływaniu środków odladzających na beton kruszywa szarogłazowe istotnie przyczyniły się do degradacji betonu, ujawniającego się przez znaczne spękania i znaczne obniżenie współczynnika sprężystości [16].

Kruszywa amfibolitowe występujące w Polsce są uznawane za niereaktywne, co jest potwierdzone obserwacjami dotychczas eksploatowanych obiektów betonowych. Natomiast dane literaturowe [14] wskazują, że wśród minerałów głównych amfibolitu mogą występować hornblenda, plagioklasy, kwarc, epidot, kalcyt i tytanit, w żyłach występuje kwarc, chloryt i kalcyt. Reaktywną fazą amfibolitu jest przede wszystkim kwarc mikrokryształiczny, a także kwarc kryptokryształiczny występujący w żyłach i strefach ścinania. Zarówno rodzaj minerałów reaktywnych, jak też ich ilość wpływają ostatecznie na podatność kruszywa na reakcję z wodorotlenkami sodu i potasu w betonie.

a)



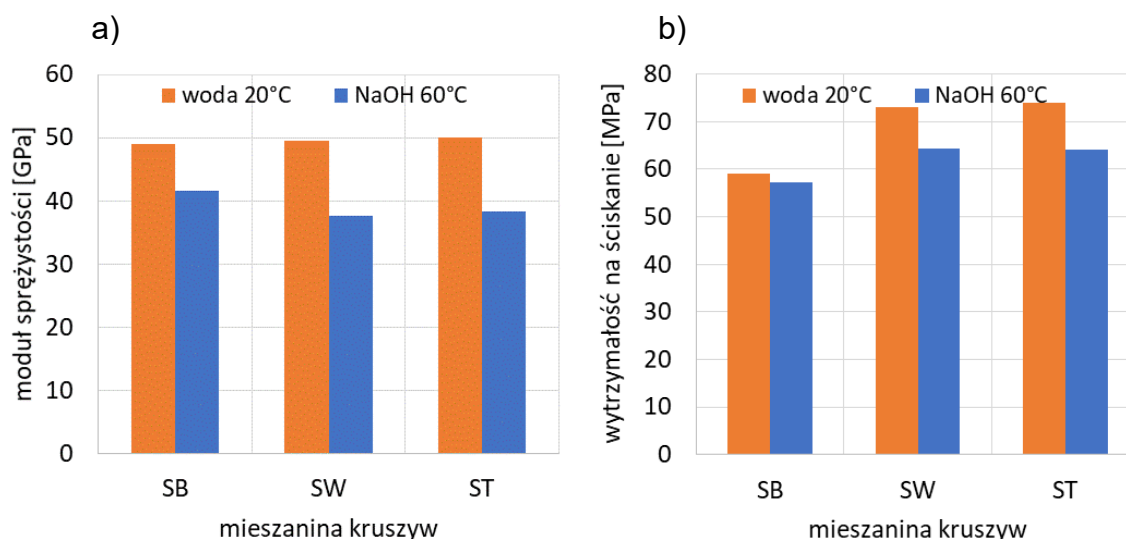
b)



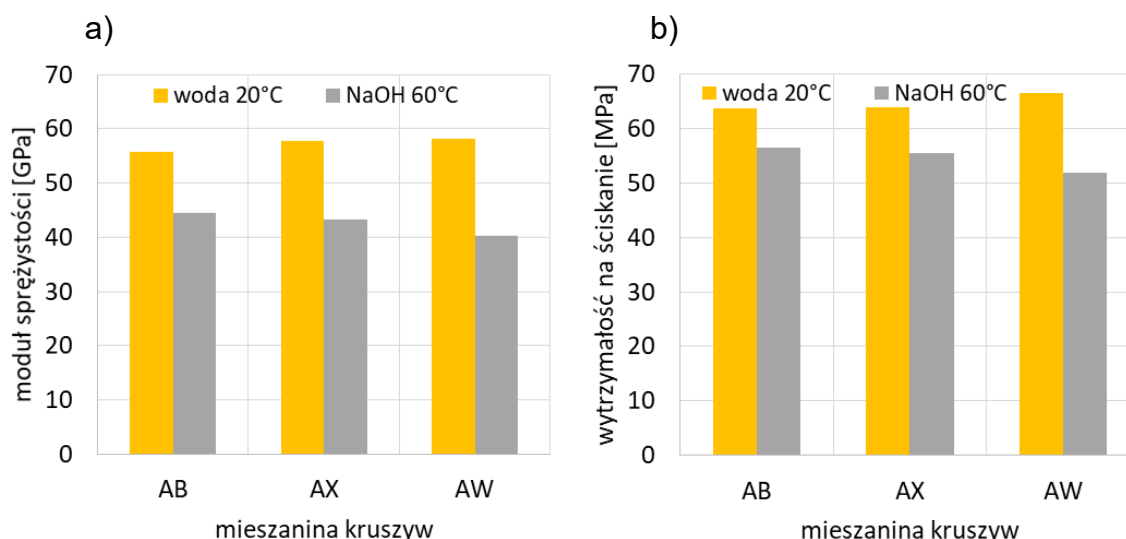
Rys. 1. Wydłużenie próbek betonowych z grysem szarogłazowym (a) i grysem amfibolitowym (b) w czasie przechowywania w roztworze NaOH w temperaturze 60°C.

W przypadku wszystkich mieszanin kruszyw zauważono wpływ zastosowanego kruszywa drobnego na końcową ekspansję próbek betonu - im większa potencjalna reaktywność piasku, tym większa końcowa ekspansja mieszaniny kruszyw w MCPT. Po zamianie piasku kwarcowego potencjalnie niereaktywnego (B) na piasek potencjalnie reaktywny (W) nastąpił umiarkowany wzrost wydłużenia, ok. 20%-30%, próbek betonu z szarogłazem (S), natomiast w przypadku amfibolitu (A) było to aż 110%. Podobną korelację tj. istotny wpływ reaktywności piasku na końcową ekspansję próbek betonowych stwierdzono w badaniach z udziałem zewnętrznego dostępu alkaliów [16]. W pracy [17] piasek rzeczny został zidentyfikowany jako przyczyna uszkodzeń wskutek ASR w analizowanych konstrukcjach, a w badaniach laboratoryjnych wykazano, że w zależności od rodzaju zastosowanego niereaktywnego kruszywa grubego (wapień i granit) klasyfikacja reaktywności piasku może ulec zmianie.

W przypadku wszystkich analizowanych próbek betonu stwierdzono spadek rezonansowego modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie betonu na skutek przechowywania próbek w roztworze NaOH w temperaturze 60°C (Rys.2 i 3). Redukcja modułu sprężystości była tym większa im większa reaktywność piasku stosowanego w stosie okrucowym kruszywa. Próbki z piaskiem reaktywnym (W) po przechowywaniu w warunkach promujących rozwój ASR charakteryzowały się wyraźnie niższym modułem sprężystości niż próbki z piaskiem niereaktywnym – odwrotnie niż w próbkach referencyjnych przechowywanych w wodzie. W przypadku wytrzymałości na ściskanie nie zauważono podobnej zależności, chociaż przechowywanie próbek w warunkach promujących ASR wywołało wyraźny spadek wytrzymałości – od 2% do 15%.



Rys. 2. Rezonansowy moduł sprężystości (a) i wytrzymałość na ściskanie (b) próbek betonu po ich przechowywaniu przez 84 dni w warunkach promujących ASR i próbek referencyjnych przechowywanych w wodzie – beton z grysem szarogłazowym.



Rys. 3. Rezonansowy moduł sprężystości (a) i wytrzymałość na ściskanie (b) próbek betonu po ich przechowywaniu przez 84 dni w warunkach promujących ASR i próbek referencyjnych przechowywanych w wodzie – beton z grysem amfibolitowym.

Stopień pogorszenia właściwości mechanicznych jest istotnym czynnikiem oceny ryzyka związanego w wystąpieniem reakcji [12]. Na ogół oczekuje się, że wszystkie właściwości mechaniczne betonu pogarszają się w wyniku destrukcyjnego działania reakcji alkalia-kruszywo, a stopień pogorszenia właściwości mechanicznych zależy od reaktywności kruszywa, uziarnienia i właściwości ekspansywnych produktów ASR. W wyniku ekspozycji próbek betonowych na 60°C i wysoką wilgotność w pracy [18] stwierdzono wyraźny spadek modułu sprężystości o 21-36% i umiarkowany spadek wytrzymałości na ściskanie 7%-14%. Uzyskane aktualnie wyniki badań potwierdzają ten zakres zmian właściwości mechanicznych oraz potwierdzają zróżnicowaną podatność tych właściwości na uszkodzenia wywołane przez ASR – moduł sprężystości betonu jest najlepiej skorelowany z zasięgiem uszkodzeń wskutek reakcji alkalia-kruszywo w betonie.

4. Perspektywy wykorzystania, kierunki badań

Nie ma porównywalnych, wcześniejszych wyników badań krajowych, dotyczących wpływu reaktywnego kruszywa drobnego na ekspansję betonu z mieszaniną kruszywa drobnego i grubego. Według tzw. starej normy, tj. PN-B-06714-34:1991/Az1:1997 [19] badania ekspansji prowadzone były na próbkach pryzmatycznych o przekroju 25x25mm na kruszywie rozdrobnionym do 4 mm. Wówczas nie było możliwości jednoczesnego zastosowania kruszywa drobnego i grubego >4 mm, aby rozpoznać interakcję różnych frakcji. Również z powodu małego przekroju próbek nie było możliwości racjonalnego zastosowania kruszywa grubego, jako że z podstaw mechaniki betonu wynika, że wymiar przekroju próbki powinien być co najmniej 4 razy większy od maksymalnego wymiaru ziarna kruszywa. Niekontrolowany wyciek alkaliów z próbek o tak małym przekroju poprzecznym, przechowywanych wg starej normy, w znaczącym stopniu zwiększał niepewność oznaczenia reaktywności alkalicznej kruszyw. Zastrzeżenia wobec wiarygodności „starej normy” były wielokrotnie publikowane, np. [20], ale dopiero wyniki diagnostyki

przeprowadzonej w roku 2018 [2] potwierdziły je na konkretnym przykładzie nawierzchni z betonu. Niedawne krajowe badania ekspansji zaprawy w 1 molowym roztworze NaOH w temperaturze 80°C przeprowadzono zastępując kolejne frakcje rozdrobnionego kruszywa niereaktywnym kruszywem wapiennym [21]. Wykazano, że frakcja 1-2 mm wywołuje nieco większą ekspansję zaprawy niż frakcja 2-4 mm, podobnie jak w pracy [3].

Oprócz wyników wspomnianej już pracy [17], objaśniającej znaczącą rolę reaktywnego piasku w betonie, znane są porównywalne doświadczenia zagraniczne z krajów sąsiadujących z Polską. Na podstawie doświadczeń niemieckich piaski i żwiry z kilku cieków rzecznych (Łaby, Muldy, Elstery) w obszarze dawnego zlodowacenia są normowo wykluczone z kategorii niereaktywnej [22]. Wybrane, niedawno rozpoznane niemieckie przypadki reaktywności kruszywa o istotnym znaczeniu gospodarczym pobieżnie opisano np. w [23]- autostrada A12 i most graniczny nad Odrą, [24] - podkłady kolejowe Deutsche Bahn. Znane są też porównywalne doświadczenia z rozpoznawania reaktywności kruszyw z Litwy i krajów skandynawskich. Badania wykazują, że zakres wielkości ziaren kruszywa najbardziej wpływających na ekspansję wskutek reakcji alkalia–krzemionka zależy od składu mineralnego kruszywa. W kilku publikacjach analizowano wpływ różnych rozmiarów reaktywnych ziaren, np. opalu, na ekspansję betonu. Zauważono, że mniejsze ziarna zwykle powodują większą ekspansję, jednak dla ziaren o średnicy poniżej 50–150µm ekspansja na ogół jest znikoma. Efekt pesymium, czyli maksymalnej ekspansji przy określonej wielkości ziaren, odnotowano w literaturze dla różnych kruszyw w szerokim zakresie uziarnienia, niekiedy dla ziaren > 1 mm.

Mniej uwagi poświęcono w literaturze wpływowi rozmiaru przekroju próbki na wyniki pomiarów ekspansji. Badania pokazują, że mniejsze próbki wykazują mniejszą ekspansję wywołaną reakcją ASR, co oznacza istnienie tzw. efektu skali – współzależności między rozmiarem ziaren kruszywa, wymiarami przekroju próbki i zawartością reaktywnej krzemionki. Efekt pesymium może nie być cechą samej reakcji ASR, ale wynikać z geometrii próbki i specyficznego rozkładu naprężeń. Efekt skali wyjaśniono w [25] na podstawie pojęć mechaniki pękania, dochodząc do stwierdzenia, że większy stosunek rozmiaru maksymalnego ziarna kruszywa do rozmiarów przekroju próbki powoduje większe naprężenia i szybsze pękanie, co umożliwia rozprężenie żelowych produktów reakcji. Dlatego interpretacja wyników powinna uwzględniać złożoną charakterystykę zjawisk ekspansyjnych.

Zastosowanie metody MCPT do oceny reaktywności krajowych kruszyw może przynieść korzyści ekonomiczne. Z pobieżnego oszacowania wynika, że przewidywane koszty wykonania badań metodą MCPT będą zbliżone do kosztu badań metodą przyspieszoną wg GDDKiA PB/1/18 (brak kruszenia kruszywa grubego, niższa temperatura 60°C zamiast 80°C, ale dłuższy czas – 8 tygodni zamiast 2 tygodni). Korzyści ekonomiczne trzeba przede wszystkim oczekiwać w polepszonej jakości oceny kruszyw, zwłaszcza zestawów kruszywa drobnego i grubego. Długotrwałe metody badawcze, jak PB/2/18 trwająca 12 miesięcy, nie są wystarczająco zabezpieczone przed wyciekaniem alkaliów z próbek na zewnątrz, co powoduje rozbieżności bądź wątpliwości oceny. Przeprowadzone badania porównawcze wg PB/2/18 i RILEM AAR-13 [26] wykazały znaczące zmniejszenie ekspansji betonu badanego bez kontroli wycieku alkaliów. Niestety procedura RILEM AAR-13 [26], polegająca na owijaniu próbek bandażem nasączonym roztworem alkalicznym, jest

nader skomplikowana i ma niewielką przydatność do powszechnego stosowania w laboratoriach materiałów budowlanych.

Metodyka MCPT jest ciągle mało znana poza Ameryką Północną. Niedawny raport z badań sponsorowanych przez AASHTO i Transportation Research Board [27] zawiera najbardziej aktualne zalecenia dotyczące ulepszenia dotychczas stosowanych metod ASTM do oceny reaktywności alkalicznej kruszyw w betonie przeznaczonym do budowy infrastruktury drogowej. Ponieważ krajowe wytyczne GDDKiA do klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich są metodycznie oparte o procedury ASTM i RILEM sprzed roku 2019, warto zapoznać się z następującymi wnioskami z raportu [27]:

1. Długotrwałe badanie reaktywności alkalicznej kruszywa w betonie metodą ASTM C1293 (odpowiednik PB/2/18 [6]) jest nadal uznawane za najlepszy sposób selekcji kruszywa niereaktywnego na podstawie kryterium 12 miesięcznego wydłużenia próbek $\leq 0,04\%$ (kategoria R0 wg [6]);
2. Istnieje duża zgodność oceny reaktywności alkalicznej kruszywa i identyfikacji kruszywa niereaktywnego na podstawie wspomnianej powyżej metody ASTM C1293 (wydłużenie $\leq 0,04\%$ po 12 miesiącach) i metody MCPT według normy AASHTO T 380 [8] (wydłużenie $\leq 0,03\%$ po 56 dniach).

W rezultacie podsumowania [27] metoda AASHTO T 380 została zalecona jako miarodajna alternatywa dla długotrwałej metody ASTM C1293 do selekcji kruszyw niereaktywnych. Ponadto, metoda AASHTO T 380 została też zalecona jako narzędzie do określenia niezbędnej zawartości dodatków mineralnych w składzie betonu w celu zapobiegania szkodliwym skutkom reakcji alkalia-kruszywo. Niezbędną zawartość dodatków mineralnych należy określić stosując kryterium wydłużenia próbek betonu $\leq 0,025\%$ po 84 dniach ekspozycji zgodnie z procedurą AASHTO T 380 [8]. Warto tu zauważyć, że powyższe kryterium zaproponowane w [27] i jeszcze nie skodyfikowane, zostało zastrzeżone (czas wydłużony z 56 do 84 dni) w stosunku do oryginalnego w dotychczasowej wersji [8].

Konieczność oceny przydatności środków zapobiegawczych do hamowania degradacji betonu wskutek reakcji alkalia-krzemionka pojawia się wtedy, gdy wiemy na pewno że kruszywo jest potencjalnie reaktywne lub mamy uzasadnione przypuszczenie, że może być reaktywne, jak np. w przypadku kruszywa z recyklingu zgodnie z PN-EN 12620+A1:2010, G.3.2 [28]. Zastosowanie metody MCPT w takim zakresie może przynieść kolejne korzyści ekonomiczne, ponieważ ma znaczny potencjał do szczegółowego rozpoznania zakresu zastosowań innowacyjnych dodatków do betonu oraz cementu z innowacyjnymi nieklinkierowymi składnikami głównymi. Określenie „innowacyjny” obejmuje tu aktywne dodatki mineralne lub składniki główne cementu poza zakresem dodatków dobrze rozpoznanych, takich jak krzemionkowy popiół lotny, mielony granulowany żużel wielkopiecowy lub pył krzemionkowy. Skuteczność procedury badawczej GDDKiA PB/4/18 [29], opartej o metodę ASTM C1567 badania zaprawy w temperaturze 80 °C, została ustalona w odniesieniu do dobrze znanych powyższych dodatków. Widmo emisyjności i niedostatku surowców do produkcji cementu i betonu napędza poszukiwania nowych surowców mineralnych lub odpadowych, niekiedy wśród surowców o podwyższonej zawartości tlenków sodu i potasu. Do ustalenia ich przydatności w zakresie odporności na szkodliwą reakcję ASR może posłużyć metoda AASHTO T380. Postęp tym

zakresie wymaga jednak dodatkowych badań, zwłaszcza rozpoznania składu cieczy porowej betonu z innowacyjnymi dodatkami.

Do rozpoznawania potencjalnej reaktywności kruszywa z odpowiednim marginesem bezpieczeństwa przechowywanie próbek betonu w 1 molowym roztworze NaOH ma sens. Do kwalifikacji przydatności środków zapobiegawczych (zwłaszcza nowych dodatków mineralnych) i prognozowania długoterminowej degradacji betonu należy raczej ustalić warunki otoczenia stabilizujące dany skład cieczy porowej, zwłaszcza zapobiegając wymywaniu alkaliów. Kinetyka reakcji alkalia-krzemionka zależy przede wszystkim od stężenia jonów sodu i potasu w cieczy porowej. Stężenie alkaliów w roztworze porowym betonu zmienia się z upływem czasu, zatem jednoznaczne określenie jego stężenia jest dość trudne. Na stężenie alkaliów w cieczy porowej betonu wpływają następujące czynniki:

- zawartość alkaliów w cemencie i dodatkach mineralnych,
- stopień przereagowania faz zawierających alkalia w cemencie i dodatkach mineralnych,
- absorpcja alkaliów przez ziarna kruszywa albo ich uwalnianie z kruszywa, w zależności od jego charakterystyki,
- adsorpcja alkaliów przez fazę C–A–S–H przy niskim stosunku $Ca/(Si + Al)$,
- przyłączanie alkaliów przez żelowe produkty reakcji z reaktywną krzemionką,
- ewentualne wnikanie roztworów alkalicznych z otoczenia,
- w/c, wiek betonu i wilgotnościowe warunki środowiska, wpływające na powyższe czynniki.

Mówiąc zatem o zawartości alkaliów w cieczy porowej konieczne jest przyjęcie upraszczających założeń, dotyczących sposobu jej określania. Jeżeli pominąć zewnętrzne źródła alkaliów (np. roztwory soli odladzających), to najwyższe stężenie alkaliów w roztworze porowym uzyskuje się biorąc pod uwagę tylko pierwszy z powyższych czynników i pomijając inne efekty jako mało istotne. Nawet w przypadku kruszywa niereaktywnego, karbonatyzacja zaczynu cementowego i nasiąkanie betonu wilgocią wpływają na przemieszczanie się alkaliów.

Co najmniej od czasu publikacji Diamonda [30], wiadomo, że skład chemiczny żelowych produktów ASR zmienia się w zależności od otaczającego środowiska, w tym temperatury, reaktywności kruszywa, zawartości alkaliów itp. Istotne znaczenie ma dostępność jonów Ca^{+2} , która decyduje o tworzeniu żelu o niskiej lub wysokiej zawartości wapnia, co z kolei różnicuje właściwości fizyczne żelu ASR, takie jak zdolność pęcznienia, lepkość i sztywność [31]. Ostatecznie to zdolność pęcznienia żelowych produktów reakcji pomnożona przez ich ilość określa niszczącą siłę wywołującą spękania i odpryski w betonie.

Powyższe uwagi i wstępna analiza niepublikowanych jeszcze wyników IPPT PAN wskazują na potrzebę badań w kierunku modyfikacji metody MCPT przy jej zastosowaniu do kwalifikacji przydatności nowych dodatków mineralnych. Potrzeba modyfikacji dotyczy roztworu służącego do przechowywania próbek betonu. Standardowa kąpiel w 1 molowym NaOH stale dostarcza „paliwa” do reakcji, co może znacząco przesłaniać rozpoznanie skuteczności środków zapobiegających rozwojowi uszkodzeń betonu wskutek reakcji alkalia-krzemionka.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski.

1. Zastosowanie metody „Miniature Concrete Prism Test” (MCPT) do oceny reaktywności alkalicznej mieszaniny różnych frakcji kruszywa mineralnego o zróżnicowanej reaktywności pozwala na wyodrębnienie wpływu frakcji drobnej na ekspansję betonu wskutek reakcji alkalia-krzemionka. Zróżnicowanie potencjalnej reaktywności naturalnych piasków kwarcowych wpływa na znaczny wzrost ekspansji próbek betonu, sięgający do 110% po 84-dniowej ekspozycji próbek w roztworze NaOH w temperaturze 60°C.
2. Ekspansja próbek betonu w środowisku promującym rozwój reakcji alkalia-krzemionka jest skorelowana z redukcją rezonansowego modułu sprężystości. Przy zwiększonej potencjalnej reaktywności piasku naturalnego, stosowanego w stosie okruszowym kruszywa, następuje szybsza redukcja modułu sprężystości betonu.
3. Metoda oznaczania reaktywności kruszywa w betonie w 1 molowym roztworze NaOH o temperaturze 60°C pozwala na kategoryzację reaktywności alkalicznej w sposób analogiczny, jak metody dotąd stosowane w kraju.

Podziękowania

Praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Nauki jako część projektu Preludium pt. „Przewidywanie właściwości termo-sprężystych materiałów kompozytowych w układzie aktywnej krzemionki z wodorotlenkami metali alkalicznych w polu temperatury i promieniowania gamma” (2023/49/N/ST8/02157).

6. Bibliografia

- [1] Owsiak Z. Korozja wewnętrzna betonu. Monografie, Studia, Rozprawy (M66). Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce (2015)
- [2] Glinicki M.A., Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Antolik A., Dziedzic K., Dąbrowski M., Bogusz K., Lisowski P., Analiza przyczyn uszkodzeń jednowarstwowej betonowej nawierzchni drogi ekspresowej, Roads and Bridges-Drogi i Mosty, 21 (3) (2022) 183-201
- [3] Dunant C.F., Scrivener K.L., Effects of aggregate size on alkali-silica reaction induced expansion, Cement and Concrete Research 42 (6) (2012) 745–751
- [4] Multon S., Leklou N., Petit L., Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion, Cement and Concrete Research 38 (3) (2008) 350–359
- [5] Procedura Badawcza GDDKiA PB/1/18 Instrukcja badania reaktywności kruszyw metodą przyspieszoną w 1 M roztworze NaOH w temperaturze 80°C. GDDKiA (2019)
- [6] Procedura Badawcza GDDKiA PB/2/18 Instrukcja badania reaktywności kruszyw w temperaturze 38°C według ASTM C1293/RILEM AAR-3. GDDKiA (2019)
- [7] Lindgård, J., Andiç-Çakir, O., Fernandes, I., Rønning, T.F., Thomas, M.D.A., Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing, Cement and Concrete Research 42(2) (2021) 223-243

- [8] AASHTO T 380 Standard Method of Test for Potential Alkali Reactivity of Aggregates and Effectiveness of ASR Mitigation Measures (Miniature Concrete Prism Test, MCPT), American Association of State Highway and Transportation Officials (2019)
- [9] Latifee E.R., Rangaraju P.R., Miniature Concrete Prism Test: Rapid Test Method for Evaluating Alkali-Silica Reactivity of Aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (7) (2015)
- [10] Konduru H., Rangaraju P.R., Amer O., Reliability of Miniature Concrete Prism Test in Assessing Alkali-Silica Reactivity of Moderately Reactive Aggregates, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674 (4) (2020)
- [11] Tanesi J., Drimalas T., Chopperla K.S.T., Beyene M., Ideker J.H., Kim H., Montanari L., Ardani A., Divergence between Performance in the Field and Laboratory Test Results for Alkali-Silica Reaction, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674 (5) (2020)
- [12] Dziedzic K., Glinicki M.A., Risk assessment of reactive local sand use in aggregate mixtures for structural concrete, *Construction and Building Materials*, 408 (2023) 133826
- [13] Dziedzic K., Glinicki M.A., Assessment of aggregate mixture reactivity in concrete at 60°C, *Structure and Environment* 16 (3) (2024) 153-157; DOI: 10.30540/sae-2024-015
- [14] Fernandes I., Ribeiro A.M., Broekmans M., Sims I., *Petrographic Atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis*, RILEM TC 219-ACS Recommended Guidance AAR-1.2, for use with the RILEM AAR-1.1 Petrographic Examination Method, Springer (2016)
- [15] Glinicki M.A., Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Antolik A., Dziedzic K., Gibas K., Podatność wybranych kruszyw ze skał osadowych na reakcję alkalia-kruszywo, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 18 (10) (2019) 5-24
- [16] Bogusz K., Glinicki M.A., Stabilność objętościowa i właściwości sprężyste betonu w symulowanych warunkach oddziaływania eksploatacyjnego na nawierzchnie drogowe, *Cement Wapno Beton*, 27(6) (2022) 410-424
- [17] Deschenes R.A., Hale W.M., Alkali-silica reaction in concrete with previously inert aggregates, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31 (2) (2019)
- [18] Hafci A., Turanli L., Bektas F., Wpływ rozszerzalności powodowanej reakcją kruszywa z wodorotlenkami sodu i potasu na właściwości mechaniczne betonu, *Cement Wapno Beton*, 26(1) (2021) 12-23
- [19] Drimalas T., Folliard K.J., Ideker J.H., Parashar A., Thomas M.A.D., Ghanizadeh A., Hossack A.M., Fournier B., *Alkali-Silica Reactivity Potential and Mitigation: Test Methods and State of Practice*, NCHRP Research Report 1083, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC, 2023
- [19] PN-B-06714-34:1991/Az1:1997 *Kruszywa mineralne - Badania - Oznaczenie reaktywności alkalicznej*
- [20] Góralczyk S. Reaktywność alkaliczna kruszyw - czas wprowadzić doskonalsze metody badania, *Kruszywa* nr 2/2011, str. 13-15.
- [21] Zapła-Sławeta J., Impact of Aggregate Grain Size on ASR-Induced Expansion, *Materials* 2023, 16(24), 7506; <https://doi.org/10.3390/ma16247506>

- [22] DAfStb – Richtlinie: Vorbeugende Massnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali – Richtlinie). Ausgabe Oktober 2013
- [23] <https://porr.de/projekte/a12-frankfurt-oder/> - materiały informacyjne firmy PORR
- [24] <https://afdfraktion-lsa.de/schaeden-infolge-von-betonkrebs-an-schienenstrecken-der-deutschen-bahn-2/> - interpelacja poselska w sprawie wypadku kolejowego w pobliżu Garmish-Partenkirchen
- [25] Gao X. X., Multon S., Cyr M., Sellier A., Alkali-silica reaction (ASR) expansion: Pessimism effect versus scale effect, *Cement and Concrete Research* 44 (2013) 25–33
- [26] Yamada K., Kawabata Y., de Rooij M.R., Pedersen B.M., Brueckner R., Ideker J.H., Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-13: application of alkali-wrapping for concrete prism testing to assess the expansion potential of alkali-silica reaction. *Materials and Structures* 54, 201 (2021). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01684-z>
- [27] Drimalas T., Folliard K.J., Ideker J.H., Parashar A., Thomas M.A.D., Ghanizadeh A., Hossack A.M., Fournier B., Alkali-Silica Reactivity Potential and Mitigation: Test Methods and State of Practice, NCHRP Research Report 1083, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC, 2023
- [28] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu
- [29] Procedura Badawcza GDDKiA PB/4/18 Określenie potencjalnej reaktywności mieszaniny cementu, dodatków mineralnych i kruszyw według zmodyfikowanej metody ASTM C1567, GDDKiA
- [30] Diamond S., Chemistry and other characteristics of ASR gels, in: *Proceedings of the 11th Int. Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Quebec, Canada, 2000, pp. 31–40.
- [31] Joo H.E., Takahashi Y., Analytical and experimental studies on alkali-silica reaction mechanism: Aggregate cracking and chemical composition change of gel, *Cement and Concrete Composites* 139 (2023) 105003