

Michał A. Glinicki ¹

OCENA REAKTYWNOŚCI ALKALICZNEJ KRUSZYW

1. Wprowadzenie

Zgodnie z PN-EN 206, jeżeli kruszywo zawiera odmiany krzemionki podatne na reakcję z alkaliami pochodzącymi z cementu, środków odładzających lub innych źródeł, a beton narażony jest na działanie środowiska wilgotnego, trzeba przeciwdziałać szkodliwym skutkom reakcji alkalia-krzemionka (ang. alkali-silica reaction, ASR). Reakcja alkalia-kruszywo zachodzi między roztworem w porach betonu i reaktywnymi minerałami w ziarnach kruszywa, ewentualnie prowadząc do ekspansji i znacznych spękań betonu [1, 2]. Z licznych badań wynika [3, 4], że do reaktywnych kruszyw krajowych można zaliczyć niektóre piaski i żwiry zawierające opal i chalcedon, piaskowiec, wapień krzemionkowy. Również niektóre kruszywa ze skał litych wykazują podatność na reakcję z wodorotlenkami alkalicznymi w betonie, np. kruszywa produkowane z następujących skał: rogowców, łupków ilasto-mikowych, gnejsów granitowych i granitowo-diorytowych, szarogłazów i kwarcytów. Przeciwdziałanie występowaniu reakcji polega przede wszystkim na selekcji kruszywa niereaktywnego oraz ograniczeniu właściwości składników betonu stosownie do zagrożenia.

¹ prof. dr hab. inż., Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Pawińskiego 5 B, 02-106 Warszawa; email: mglinic@ippt.pan.pl

Stosowana dotąd w Polsce metodyka oceny reaktywności kruszyw mineralnych opiera się na zestawie procedur ujętych w normach PN [5-7], stosowanych od początku lat 90. XX wieku, ale wycofanych ze zbioru PKN w roku 2002, za wyjątkiem normy [5]. Pierwowzorem krajowych norm były m.in. ówczesne wersje norm ASTM C227 i ASTM C 289, obie wycofane ze zbioru ASTM, jako niezgodne z aktualnym stanem wiedzy i techniki. Sprzeczność oceny reaktywności niektórych kruszyw krajowych metodą chemiczną ASTM C289 i metodami o większej wiarygodności wykazano w odniesieniu do kruszyw z litych skał magmowych i osadowych [2]. Również w przypadku niektórych krajowych kruszyw żwirowych i węglanowych [1] wykazano niezgodność oceny reaktywności metodami PN-EN i bardziej nowoczesnymi metodami RILEM. W licznych przypadkach zerowy stopień reaktywności alkalicznej uznaje się za niedostatecznie wiarygodne określenie braku podatności kruszywa na reakcję z wodorotlenkami alkalicznymi w betonie.

2. Rozpoznanie reaktywności kruszywa

Bogate doświadczenia praktyczne zgromadzone na kontynencie amerykańskim i w Europie pozwoliły na opracowanie strategii rozpoznawania kruszyw reaktywnych i przeciwdziałania szkodliwym skutkom reakcji. Zgodnie z normą ASTM C 1778 [8] oraz zaleceniami RILEM [9] odpowiednie postępowanie przy selekcji kruszywa polega na zastosowaniu metod badawczych wymienionych w tabeli 1.

Tabela 1. Metody rozpoznania podatności kruszywa na reakcję alkalia-krzemionka w betonie zgodnie z zaleceniami ASTM i RILEM

Metody rozpoznania podatności kruszywa na reakcję	
1	Analiza petrograficzna kruszywa na cienkich szlifach
2	Badanie ekspansji próbek zaprawy z kruszywem w 1 N roztworze NaOH w temperaturze 80 °C
3	Badanie ekspansji próbek betonu z kruszywem w środowisku wysokiej wilgotności RH>98% w temperaturze 38 °C lub 60 °C

Analiza petrograficzna kruszywa jest badaniem rozpoznawczym, które ma na celu identyfikację potencjalnie reaktywnych minerałów w kruszywie, zwłaszcza za pomocą obserwacji mikroskopowych na zgładach i cienkich szlifach [10-11]. Rozpoznanie minerałów i skał dokonuje się przez odniesienie do lokalnych baz danych oraz doświadczenia petrografa. Badania są ukierunkowane na identyfikację obecności minerałów reaktywnych, takich jak: opal, krystobalit, trydymit, szkliwo krzemionkowe, chalcedon, krypto- oraz mikrokrystaliczny kwarc, oraz kwarc w stanie naprężeń. Zależnie od wyników badania, kruszywo przypisuje się do jednej z trzech kategorii reaktywności, z uwzględnieniem dominującego składnika kruszywa (kruszywo krzemionkowe S, kruszywo węglanowe C, kruszywo krzemionkowo-węglanowe SC):

- kategoria I: kruszywo niereaktywne;
- kategoria II: kruszywo potencjalnie reaktywne (niepewność rozpoznania reaktywności);
- kategoria III: kruszywo reaktywne.

Zaleca się wykonanie dalszych badań kruszywa z wykorzystaniem pozostałych metod, wymienionych powyżej

W roku 2018 metody wymienione w tabeli 1, dostosowane do warunków wykorzystania w kraju, zostały wprowadzone do stosowania w Polsce na podstawie instrukcji zamieszczonych w Załącznikach 1 i 2 do „Ogólnej Specyfikacji Technicznej D - 05.03.04 Nawierzchnie z Betonu Cementowego” [12], wydanej przez GDDKiA. Obie instrukcje dotyczą oceny reaktywności kruszyw mineralnych z wodorotlenkami sodu i potasu występującymi w cieczy porowej betonu. Sposób badania ekspansji próbek zaprawy z kruszywem w 1 N roztworze NaOH w temperaturze 80 °C jest zgodny z metodą przedstawioną w normie ASTM C1260-14 oraz RILEM AAR-2. Umożliwia stwierdzenie wystąpienia szkodliwej reakcji alkalia-kruszywo w ciągu 16 dni na podstawie oznaczenia zmiany długości próbek zaprawy cementowej z badanym kruszywem. Jest to tzw. przyspieszona metoda badania ekspansji pró-

bek. Metoda długotrwałego badania ekspansji próbek betonu jest oparta na zasadach opisanych w normie ASTM C1293 z modyfikacjami wymaganymi w warunkach krajowych, zgodnie ze wskazówkami RILEM AAR-3. Umożliwia stwierdzenie wystąpienia szkodliwej reakcji alkalia-kruszywo w ciągu 365 na podstawie oznaczenia zmiany długości próbek betonu z badanym kruszywem. Przyjęte kryteria oceny reaktywności kruszywa podane są w tabeli 2.

Tabela 2. Ocena reaktywności kruszywa grubego i drobnego na podstawie średniej zmiany długości próbek zaprawy lub próbek betonu zgodnie z procedurami w Ogólnej Specyfikacji Technicznej D - 05.03.04 Nawierzchnie z Betonu Cementowego, GDDKiA 2018

Kategoria reaktywności kruszywa	Opisowe określenie reaktywności	14-dniowa zmiana długości próbek zaprawy, %	365-dniowa zmiana długości próbek betonu, %
R0	niereaktywne	$\leq 0,10$ (0,15*)	$\leq 0,04$
R1	umiarkowanie reaktywne	$>0,10$ (0,15*); $\leq 0,30$	$>0,04$; $\leq 0,12$
R2	silnie reaktywne	$>0,30$; $\leq 0,45$	$>0,12$; $\leq 0,24$
R3	bardzo silnie reaktywne	$>0,45$	$>0,24$

*) kruszywo drobne

3. Strategia zapobiegania szkodliwym skutkom reakcji

Strategia zapobiegania uszkodzeniom betonu wskutek ASR polega przede wszystkim na rozpoznaniu ryzyka obniżenia funkcjonalności konstrukcji, związanego z jej wystąpieniem. Ryzyko jest związane z czynnikami prowokującymi reakcję alkalia-kruszywo w betonie oraz ważnością konstrukcji, wynikającą z ewentualnych środowiskowych lub społecznych skutków jej uszkodzenia. Na tej podstawie przyjmuje się odpowiednie ograniczenia właściwości składników i składu betonu. Jest to tzw. podejście recepturowe, które zostało systematycznie przedstawione w normach ASTM C1778:2016, AASHTO R-80: 2018 i RILEM AAR-7.1:2016 oraz zaadoptowane w wytycznych technicznych GDDKiA.

Tabela 3. Klasyfikacja konstrukcji budowlanych i inżynierskich na podstawie dotkliwości konsekwencji wystąpienia reakcji alkalia–kruszywo w betonie

Klasa	Konsekwencje ASR	Możliwość akceptacji ASR	Przykłady elementów obiektów budowlanych
S1	Pomijalne konsekwencje ekonomiczne lub środowiskowe albo dla bezpieczeństwa	Pewne uszkodzenia wskutek ASR mogą być tolerowane	– nienośne element konstrukcji wewnątrz budynków – konstrukcje tymczasowe, np. o projektowanym okresie eksploatacji do 5 lat
S2	Nieznaczące konsekwencje ekonomiczne, środowiskowe lub dla bezpieczeństwa w przypadku znacznych uszkodzeń	Akceptowalne umiarkowane ryzyko uszkodzeń wskutek ASR	– chodniki, krawężniki, ścieki – elementy konstrukcji, które łatwo wymienić
S3	Znaczące konsekwencje ekonomiczne, środowiskowe lub dla bezpieczeństwa nawet przy niewielkich uszkodzeniach	Akceptowalne niewielkie ryzyko uszkodzeń wskutek ASR	– nawierzchnie dróg lokalnych i o mniejszym znaczeniu – ściany oporowe, fundamenty – bariery autostradowe – projektowany okres eksploatacji do 50 lat
S4	Bardzo poważne konsekwencje ekonomiczne, środowiskowe lub dla bezpieczeństwa nawet przy niewielkich uszkodzeniach	Nietolerowane ryzyko uszkodzeń wskutek ASR	– nawierzchnie dróg o wysokiej jakości*, dróg klasy A, S i GP, – drogowe obiekty mostowe i przepusty, tunele ** – obiekty energetyki jądrowej – zapory wodne – newralgiczne elementy konstrukcji bardzo trudne do wymiany lub naprawy – projektowany okres eksploatacji do 100 lat
<p>*) drogi na strategicznie ważnych odcinkach sieci transportowej, zwłaszcza transeuropejskiej sieci transportowej, zgodnie z rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady Europejskiej</p> <p>**) wg eurokodów orientacyjny projektowy okres użytkowania mostów i innych konstrukcji inżynierskich wynosi do 100 lat</p>			

Pierwszy etap postępowania polega na określeniu tzw. klasy obiektu czyli klasyfikacji konstrukcji betonowej w odniesieniu do znaczenia potencjalnych skutków uszkodzeń. W tabeli 3 przedstawiono klasyfikację konstrukcji na podstawie dotkliwości konsekwencji wystąpienia reakcji. Nie toleruje się uszkodzeń wskutek ASR w przypadku takich obiektów betonowych, których nawet niewielkie uszkodzenia mogą wywołać poważne konsekwencje

ekonomiczne lub zagrozić bezpieczeństwu użytkowników. Umiarkowane ryzyko uszkodzeń wskutek ASR można akceptować w elementach konstrukcji, które łatwo wymienić, a jeszcze większe uszkodzenia można tolerować w konstrukcjach tymczasowych. O istotności uszkodzeń wskutek ASR w danym obiekcie decyduje projektant na podstawie programu funkcjonalno-użytkowego, przygotowanego przez inwestora lub zarządcę obiektu. Zasadniczym parametrem klasyfikacji obiektów jest projektowany okres użytkowania i społeczne znaczenie obiektu.

Kolejnym krokiem postępowania, niezależnie od stosowania normowych klas agresywności środowiska wg PN-EN 206, jest określenie warunków oddziaływania środowiska na beton w konstrukcji. Klasyfikuje się je zgodnie z tabelą 4, w związku z zagrożeniem występowania reakcji alkalia-kruszywo. Kategorie E1, E2 i E3 nadaje się zgodnie z CEN/TR 16349. Kategoria E3, określająca najwyższe zagrożenie wystąpieniem ASR, odpowiada warunkom ekspozycji betonu np. w nawierzchniach autostrad i dróg krajowych, na których stosuje się sole odładzające do zimowego utrzymania. Oddziaływanie środowiska na beton wewnątrz budynków w miejscach suchych podczas eksploatacji odpowiada kategorii E1. W takim środowisku reakcja ASR nie występuje.

Tabela 4. Kategorie środowiska wg ramowych specyfikacji CEN/TR 16349 związane z zagrożeniem wystąpienia szkodliwej reakcji alkalia-kruszywo

Klasa	Opis środowiska	Umiejscowienie betonu w konstrukcji
E1	warunki suche, osłonięte od wilgoci	beton wewnątrz budynków w miejscach suchych podczas eksploatacji
E2	warunki wilgotne	– betonu wewnątrz budynków miejscach wysokiej wilgotności – beton narażony na wilgoć z zewnątrz, nieagresywne wody gruntowe lub zanurzony w wodzie
E3	warunki wilgotne oraz dodatkowe negatywne czynniki środowiskowe	– beton narażony na działanie soli odładzających – beton narażony na moczenie i suszenie wodą morską lub na mgłę solną – beton wilgotny narażony na zamrażanie i rozmrażanie – beton wilgotny narażony na długotrwałe oddziaływanie podwyższonej temperatury – beton nawierzchni drogowych poddanych obciążeniom dynamicznym

Trzecim zasadniczym etapem strategii przeciwdziałania szkodliwym skutkom ASR jest szczegółowe rozpoznanie składu mineralnego kruszywa i ocena jego reaktywności. Jak objaśniono w poprzednim rozdziale, polega na przeprowadzeniu analizy petrograficznej kruszywa i badania wydłużenia próbek zaprawy lub betonu z danym kruszywem, przechowywanych w warunkach normowych, promujących wystąpienie reakcji alkalia-krzemionka. W konsekwencji przyjmuje się kategorię reaktywności kruszywa R0, R1, R2 lub R3.

Warunki zastosowania kruszywa do betonu w przypadku obiektów klasy S4, S3, S2 i S1, w kategoriach środowiska, E2 i E3, oraz przy kategorii reaktywności kruszywa R0, R1, R2, R3 podano poniżej. W przypadku betonowych nawierzchni dróg i drogowych obiektów inżynierskich kategoria oddziaływań środowiska E1 nie ma zastosowania. Z uwagi na brak odpowiednich doświadczeń krajowych Wytyczne Techniczne [13] całkowicie wykluczają użycie kruszyw R2 i R3 w betonie nawierzchniowym i w drogowych obiektach inżynierskich.

W zależności od reaktywności kruszywa i kategorii oddziaływania środowiska dobrane zostały środki zapobiegające szkodliwym skutkom reakcji alkalia-kruszywo w betonie odpowiednie dla danej klasy obiektu. Przyjmuje się następujące rozwiązania zapobiegawcze:

- ograniczenie całkowitej zawartości alkaliów ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) w mieszance betonowej do 3,0; 2,4 lub 1,8 kg/m^3 ;
- zastosowanie odpowiedniej ilości dodatków mineralnych do mieszanki betonowej: popiołu lotnego krzemionkowego lub mielonego granulowanego żużla wielkopiecowego, wprowadzanych jako składniki główne cementu lub jako dodatki typu II wg PN-EN 206;
- jednoczesne ograniczenie zawartości alkaliów w betonie i zastosowanie dodatków mineralnych.

Warunki zastosowania kruszyw mineralnych do betonu w zależności od kategorii oddziaływania środowiska oraz kategorii reaktywności kruszywa są następujące:

a) w obiekcie klasy S4 według Tabeli 3

- środowisko E2 + kruszywo R0 → zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie maks. $3,0 \text{ kg/m}^3$
- środowisko E3 + kruszywo R0 → zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie maks. $2,4 \text{ kg/m}^3$
- kruszywo R1, R2, R3 - nie ma zastosowania

b) w obiekcie klasy S3 według Tabeli 3

- środowisko E2 + kruszywo R0 → bez ograniczeń
- środowisko E3 + kruszywo R0 → zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie maks. $3,0 \text{ kg/m}^3$
- środowisko E2 + kruszywo R1 → zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie maks. $2,4 \text{ kg/m}^3$ i dodatek mineralny min. 20%FA albo min. 30%GGBS
- środowisko E3 + kruszywo R1 → zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie maks. $1,8 \text{ kg/m}^3$ i dodatek mineralny min. 20%FA albo min. 30%GGBS (wymagane potwierdzenie eksperta)
- kruszywo R2, R3 - nie ma zastosowania

c) w obiekcie klasy S2 według Tabeli 3

- środowisko E2 + kruszywo R0 → bez ograniczeń
- środowisko E3 + kruszywo R0 → zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie maks. $3,0 \text{ kg/m}^3$
- środowisko E2 + kruszywo R1 → zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie maks. $3,0 \text{ kg/m}^3$ lub dodatek mineralny min. 20%FA albo min. 30%GGBS
- środowisko E3 + kruszywo R1 → zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w betonie maks. $2,4 \text{ kg/m}^3$ lub dodatek mineralny min. 20%FA albo min. 30%GGBS
- kruszywo R2, R3 - nie ma zastosowania

Osiągnięcie wymaganego poziomu zabezpieczenia przed wystąpieniem negatywnych efektów reakcji ASR jest możliwe poprzez zastosowanie w skła-

dzie cementu lub w składzie betonu dodatków mineralnych: popiołu lotnego krzemionkowego (FA) spełniającego wymagania normy PN-EN 450-1:2012 lub granulowanego żużla wielkopiecowego (GGBS) zgodnego z wymaganiami PN-EN 15167-1:2007. Popiół lotny krzemionkowy jako dodatek aktywny do mieszanki betonowej powinien spełniać wymagania dla popiołu kategorii A i kategorii N wg normy PN-EN 450-1. Całkowitą zawartość alkaliów w mieszance betonowej wyznacza się biorąc pod uwagę alkalia w cemencie, w dodatkach mineralnych oraz domieszkach. Odpowiednie przykłady wyznaczania zawartości alkaliów w mieszance betonowej podano w [13].

4. Podsumowanie

Uszkodzenia betonu wskutek reakcji alkalia-kruszywo wystąpić mogą już po kilku- lub kilkunastu latach użytkowania, jeżeli spełnione są równocześnie następujące warunki:

- w kruszywie występują minerały reaktywne,
- w cieczy porowej betonu występuje wysokie stężenie alkaliów,
- beton ma wysoką wilgotność podczas eksploatacji obiektu.

Aby skutecznie zapobiegać uszkodzeniom betonu w wyniku reakcji alkalia-kruszywo należy wyeliminować skutecznie jeden z wyżej wymienionych czynników. Wyniki badań dowodzą, że ekspansja wywołana reakcją alkalia-kruszywo zmniejsza się lub nie występuje, jeżeli wilgotność względna RH w porach betonu spada poniżej 80%. Zmniejszenie wilgotności betonu ma ograniczone znaczenie praktyczne, zwłaszcza w elementach masywnych, betonowych nawierzchniach dróg lub drogowych obiektach inżynierskich. Dlatego zasadniczym sposobem przeciwdziałania uszkodzeniom jest selekcja kruszywa niereaktywnego oraz ograniczenie całkowitej zawartości alkaliów w betonie. Zrównoważone wykorzystanie dostępnych kruszyw do produkcji betonu, a jednocześnie wyeliminowanie lub ograniczenie skutków szkodliwej reakcji ASR, wymaga podjęcia określonych środków zapobiegawczych. Środki te są obejmują m.in. zastosowanie aktywnych dodatków mineralnych

do betonu lub jako składników głównych cementu. Środki dobierane są odpowiednio do wyników analizy zagrożeń wystąpienia szkodliwych skutków reakcji alkalia-kruszywo.

Literatura

- [1] Góralczyk S., Filipczyk M., Aktualne badania reaktywności alkalicznej polskich kruszyw, *Kruszywa Mineralne t.1*, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2017, 31-41
- [2] Naziemiec Z., Garbacik A., Adamski G.: Reaktywność alkaliczna krajowych kruszyw. *Kruszywa Mineralne t.1*, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2017, 123-132
- [3] Owsiak Z., Reakcje kruszyw krzemionkowych z alkaliami w betonie, *Ceramika – Polski Biuletyn Ceramiczny*, Vol.72, Polskie Towarzystwo Ceramiczne, Kraków 2002
- [4] Glinicki M.A., Józwiak-Niedźwiedzka D., Antolik A., Gibas K., Podatność wybranych kruszyw ze skał osadowych na reakcję alkalia-kruszywo, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 18, 1, 2019, 5-24; doi: 10.7409/rabdim.019.001
- [5] PN-B-06714-46:1992 *Kruszywa mineralne - Badania - Oznaczanie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką*
- [6] PN-B-06714-47:1988 *Kruszywa mineralne - Badania - Oznaczanie potencjalnej reaktywności alkalicznej - Oznaczanie zawartości krzemionki rozpuszczalnej w wodorotlenku sodowym (NaOH)*
- [7] PN-B-06714-34:1991 *Kruszywa mineralne - Badania - Oznaczanie reaktywności alkalicznej*
- [8] ASTM C1778 *Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, 2016
- [9] RILEM *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*, Eds. Philip J. Nixon and Ian Sims, Springer, 2016
- [10] Naziemiec Z., Pabiś-Mazgaj E.: Wstępna ocena reaktywności alkalicznej kruszyw łamanych ze złóż polodowcowych rejonu północnej Polski, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 16, 3, 2017, 203-222, doi: 10.7409/rabdim.017.014
- [11] Józwiak-Niedźwiedzka D., Gibas K., Glinicki M.A.: Rozpoznanie petrograficzne minerałów reaktywnych w kruszywach krajowych i klasyfikacja zgodnie z zasadami RILEM i ASTM, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 16, 3, 2017, 223-239; doi: 10.7409/rabdim.017.015
- [12] *Ogólna Specyfikacja Techniczna, D-05.03.04. Nawierzchnia z betonu cementowego*, GDDKiA, Warszawa 2018

- [13] Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich, projekt (marzec 2019)

GÓRAŹDŹE CEMENT S.A.
Stowarzyszenie Producentów Chemii Budowlanej
Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej

XVIII KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

REOLOGIA W TECHNOLOGII BETONU

Warszawa
2019