

mgr inż. Magdalena Sosnowska*
mgr inż. Izabela Kasprzyk*
prof. dr hab. inż. Adam Podhorecki*

Wpływ reaktywności alkalicznej kruszyw na trwałość i bezpieczeństwo konstrukcji betonowych

*The effect of alkali reactivity of aggregates on the durability
and safety of concrete structures*

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę dotyczącą reakcji alkalicznej betonu spowodowanej niepożądaną potencjalną reaktywnością alkaliczną kruszyw używanych do produkcji mieszanek betonowych oraz alkaliów zawartymi w cemencie lub/i w dodatkach i domieszkach używanych do produkcji mieszanki betonowej.

Słowa kluczowe: beton, reakcja alkalia – reaktywne alkalicznie kruszywo, destrukcja betonu.

Abstract. The article presents the issues concerning the alkaline reaction of concrete caused by undesirable potential alkaline reactivity of aggregates used in the production of concrete mixes and alkalis contained in the cement or/and additives and admixtures used in the production of concrete mix.

Keywords: concrete, the reaction of alkali – reactive alkali aggregate, concrete destruction.

W ostatnich kilkudziesięciu latach wiele zespołów badawczych pracuje nad efektywnymi, ujednoliconymi metodami badawczymi reaktywności alkalicznej kruszyw stosowanych do produkcji betonu. Potencjalna reaktywność alkaliczna kruszywa oraz alkalia (mocne związki zasadowe) prowadzą do reakcji alkalicznych, a w konsekwencji destrukcji betonu. Właściwe określenie reaktywności kruszywa umożliwia prawidłowe zaprojektowanie trwałości i bezpieczeństwa betonowych/żelbetonowych obiektów budowlanych [4].

Problematyka reakcji alkalicznych zachodzących w betonach nie jest jeszcze dobrze rozpoznana. Szczególnie dotyczy to określenia stopnia obiektywnej reaktywności kruszywa. Ze względu na złożoność reakcji alkalicznych, proces ten powinien być analizowany w przypadku konkretnego kruszywa, cementu oraz dodatków i domieszek do mieszanki betonowej z uwzględnieniem ekspozycji środowiska. Kruszywa ze skał węglanowych, stosowane powszechnie do produkcji betonów, zawierają często obok dolomitu domieszki minerałów ilastych

i bezpostaciowej krzemionki, które mogą reagować z alkaliom zawartymi w cemencie, powodując szkodliwą ekspansję w betonie.

Destrukcja betonu jest często skutkiem jednoczesnego działania różnych mechanizmów korozyjnych i ich synergicznego współdziałania, np. karbonatyzacja połączona z korozją chlorkową, skurcz betonu w połączeniu z reakcjami alkalicznymi. Ważne jest więc, aby na etapie projektowania konstrukcji betonowej przewidzieć wszystkie możliwe skutki oddziaływania zewnętrznego (środowiska) i wewnętrznego (tkwiącego w materiałach użytych do wykonania betonu), co umożliwi właściwy dobór składników mieszanki betonowej oraz zabezpieczenie betonu przed destrukcją.

Reaktywność alkaliczna kruszyw, alkalia w cemencie

Reaktywność alkaliczna kruszywa jest w praktyce często bagatelizowana. Najogólniej reaktywność można określić jako podatność kruszywa na reakcję z alkaliom zawartymi w betonie, pochodzącymi głównie z cementu. **Warunki wystąpienia reakcji alkalicznej** [8]:

- obecność kruszywa zawierającego reaktywne wtrącenia;
- wysokie pH składników betonu, głównie cementu;

- znaczna wilgotność, rzędu 80%. Ponadto reakcji alkalicznej sprzyja także wysoka temperatura.

Wyróżnia się następujące rodzaje reakcji alkalicznych [7]:

- pomiędzy alkaliom a zawartą w kruszywie aktywną krzemionką – jest to najbardziej powszechny typ reakcji pomiędzy składnikami kruszywa a wodorotlenkami sodu i potasu (roztwór alkaliczny);

- pomiędzy alkaliom a kwasem krzemowym – dotyczy to kruszyw zawierających amorficzny lub częściowo krystaliczny kwas krzemowy (np. piasek opalowy i porowaty krzemień);

- pomiędzy alkaliom a krzemianami – zachodzi przy udziale kwarcu lub innych krzemianów (np. oliwiny, pirokseny, amfibole, skalenie i miki);

- pomiędzy alkaliom a skałami węglanowymi – dotyczy kruszyw produkowanych ze skał węglanowych, tj. dolomitów i wapieni.

Większość kruszyw naturalnych ma predyspozycje do wchodzenia w reakcje z roztworami alkalicznymi, przy czym najbardziej podatne są kruszywa, które charakteryzują się dużą porowatością. Najczęściej reakcje alkaliczne zachodzą w obecności kruszywa krzemionkowego (pochodzi ze skał krzemionkowych, tj. z autogenicznej krzemionki wykształconej w postaci

* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

opalu, chalcedonu lub kwarcu; w szczególności są to piaski i żwiry) lub węglanowego (przede wszystkim wapienie, dolomity i wapienie zdolomityzowane). Do skał, które zawierają krytyczne ilości reaktywnych związków alkalicznych, należą: andezyty; fyllity; gnejsy; granity; kwarcyty; krzemienie; krzemionkowe skały węglanowe; łupki; piaskowce; porfiry; rogowce; ryolity; szarogłazy.

Związki alkaliczne najczęściej wprowadzane są do betonu wraz z cementem. Są to mocne zasady nieorganiczne, do których należą roztwory wodorotlenków wapnia, litowców i węglanów (sodu, potasu, amonu). Zawartość alkaliów powinna być obliczana z uwzględnieniem wszystkich składników betonu, ale najczęściej brana jest pod uwagę łączna zawartość tlenu sodu i potasu w cemencie [7, 8]:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O} \quad (1)$$

gdzie: 0,658 – mnożnik, uwzględniający różnicę masy molekularnej pomiędzy tlenkiem sodu (Na_2O) a tlenkiem potasu (K_2O). Zawartość alkaliów w cemencie jest różna i zależy od składu, warunków spalania paliwa przy jego produkcji oraz technologii wytwarzania, np.:

- w cementach CEM I, II, IV i V ilość alkaliów ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) jest mniejsza od 0,60%, tzw. cement niskoalkaliczny;

- w cementach hutniczych CEM III/A, CEM III/B, CEM III/C zawartość alkaliów jest znaczna i wynosi 0,95 ÷ 2,0%.

W przypadku betonów na bazie kruszywa reaktywnego, reakcja alkaliczna zajdzie tylko wówczas, gdy zawartość alkaliów, głównie w cemencie, przekroczy wartość progową (całkowita masa alkaliów w zastosowanych składnikach nie powinna przekraczać 3,5 kg/m³ betonu) [7]. Aby temu zapobiec, można zastosować cement o mniejszej zawartości aktywnych alkaliów lub zmniejszyć ogólną zawartość cementu w mieszance betonowej. Ponadto w przypadku kruszywa potencjalnie reaktywnego nie należy stosować domieszek zawierających związki alkaliczne, które wnikają natychmiast w roztwór zawarty w porach betonu, zwiększając tym samym reaktywność alkaliczną mieszanki betonowej. Zalecane są natomiast dodatki pucolanowe (pucolany naturalne, pył

krzemionkowy, popiół lotny), które zmniejszają wartość pH roztworu zawartego w porach betonu i w efekcie mniejsza ilość alkaliów wchodzi w reakcje z reaktywnymi ziarnami kruszywa [6].

Skutki reakcji alkalicznych

W wyniku reakcji alkalicznych w betonie następuje pęcznienie reagującego kruszywa, a w konsekwencji np. pękanie betonu. Przykłady destrukcji konstrukcji betonowych wywołanej reaktywnością alkaliczną przedstawiono na fotografii 1. Na powierzchni betonu widoczna jest nieregularna sieć zarysowań przypominająca pajęczynę, którą można łatwo pomylić, np. z mikrostrukturą zarysowań spowodowanych skurczem betonu.

Destrukcyjne skutki reakcji kruszywo – alkalia stwierdziliśmy m.in. podczas oceny przyczyn uszkodzeń posadzki w budynku handlowo-biurowo-magazynowym. Posadzka o powierzchni ok. 2300 m² i grubości 15 cm została wykonana z betonu C30/37 z domieszką włókien stalowych 50/1 w ilości 15 kg/m³ i włókien polimerowych w ilości 1 kg/m³. Górną powierzchnię posadzki planowano wzmocnić specjalną posypką utwardzającą w ilości minimalnej 4 kg/m³. W okresie eksploatacji, kiedy posadzka była regularnie myta wodą, pojawiły się uszkodzenia. Stwierdzono liczne drobne ubytki, kawerny i odpryski średnicy 4 ÷ 8 mm (fotografia 2). Badania laboratoryjne wykazały, że przyczyną uszkodzeń była reakcja alkalia – krzemionka pomiędzy reaktywnymi alkalicznymi ziarnami kruszywa a alkalią zawartymi w cemencie. Za-

wartość alkaliów została nieznacznie przekroczona także w przypadku spoiwa posypki (0,69%).

Metody oceny reaktywności alkalicznej kruszywa

Z norm europejskich wynika, że reaktywność alkaliczna kruszywa powinna być badana wg zasad krajowych, zawartych w normach krajów członkowskich, co jest efektem braku uregulowań w normach europejskich. W Polsce problematykę badania reaktywności alkalicznej kruszywa regulują:

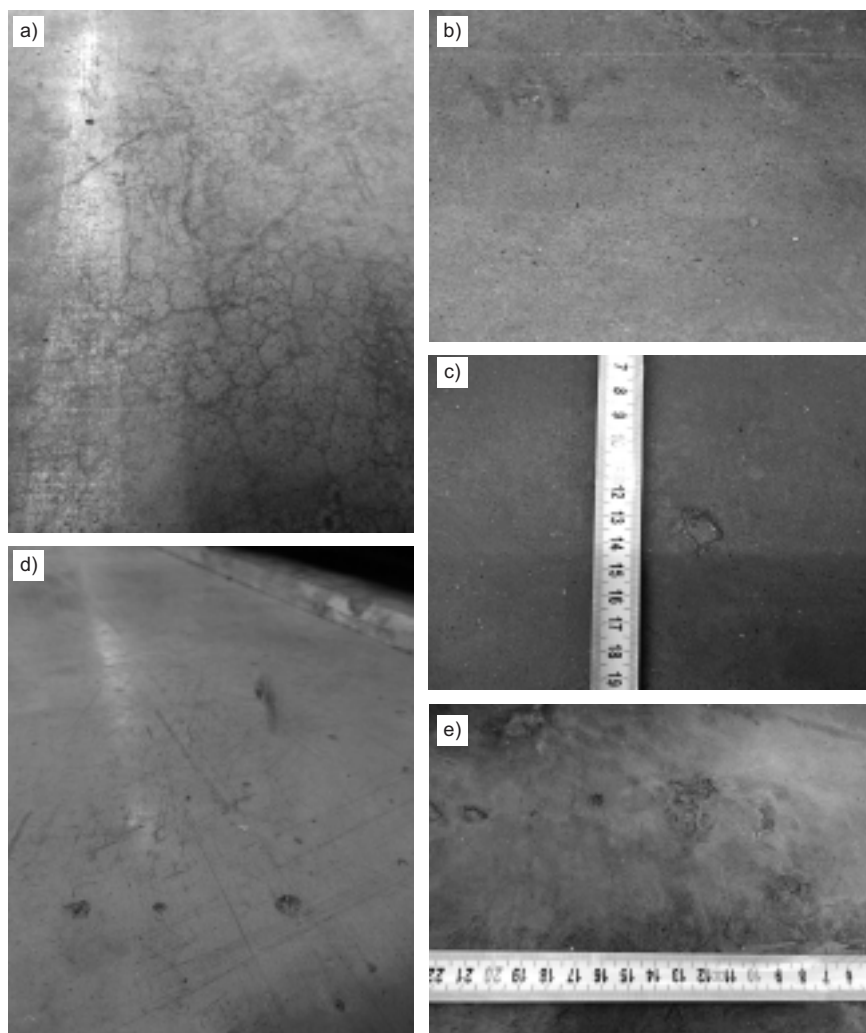
- PN-B-06714-34+AZ1:1997: *Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie reaktywności alkalicznej* (wycofana 27 listopada 2012 r. bez zastąpienia). Badanie polega na określeniu zmian destrukcyjnych (rysy, wykwyty, wycieki, odpryski, pęknięcia, zmiana barwy) oraz zmian liniowych beleczek betonowych [1];

- PN-B-06714-46:1992: *Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką*. Badanie polega na określeniu zawartości reaktywnej krzemionki oraz oznaczeniu ubytku masy kruszywa po przeprowadzeniu reakcji próbki kruszywa z wodorotlenkiem sodu [2];

- PN-B-06714-47:1988: *Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej – Oznaczenie zawartości krzemionki rozpuszczalnej w wodorotlenku sodowym (NaOH)*. Badanie polega na określeniu zawartości krzemionki rozpuszczalnej, metodą masową po reakcji próbki kruszywa z roztworem wodorotlenku sodu w temperaturze 80 °C [3].



Fot. 1. Przykładowe spękania konstrukcji wywołane reakcją alkaliczną [8]



Fot. 2. Uszkodzenia posadzki w budynku handlowo-biurowo-magazynowym: a) siatka rys skurczowych; b) „perforacja” powierzchni; c) typowe uszkodzenie; d) ślady zarysowań i wytarcia warstwy wierzchniej; e) łuszczenie warstwy wierzchniej

Fot. Autorzy

Najczęściej stosowane są dwie pierwsze metody, przy czym druga jest szczególnie ceniona z powodu krótkiego czasu trwania badania.

Stosowane obecnie w Polsce metody badania reaktywności alkalicznej nie gwarantują dokładnej oceny, czy nie ma faktycznego zagrożenia wystąpieniem reakcji alkalicznej w betonie. Zasadne wydaje się więc poszukiwanie nowych metod badawczych. Prace prowadzone są m.in. przez komitet techniczny ARP Międzynarodowego Komitetu RILEM TC ACS [5]. Ich efektem są dokumenty (AAR-0 ÷ AAR-8), w których przedstawiono procedurę postępowania z kruszywami reaktywnymi oraz opis i zakres stosowania poszczególnych metod badań. Zgodnie z proponowaną metodyką należy:

• w przypadku wszystkich rodzajów kruszywa zastosować w pierw-

szej kolejności badanie petrograficzne (AAR-1), w celu zaklasyfikowania kruszywa do odpowiedniej klasy reaktywności, a następnie, w zależności od rodzaju kruszywa, prowadzić dalsze badania szczegółowe [5]:

- w przypadku kruszyw węglanowych (np. produkowanych z wapieni, dolomitów) należy wykonać badania chemiczne oraz badanie składu mineralogicznego z wykorzystaniem analizy skaningowej (SEM), fluorescencyjnej (XRF) oraz dysfunkcyjnej (XRD). Badanie beleczek betonowych trzeba prowadzić zgodnie z dokumentem AAR-5 (szybkie badanie kruszyw węglanowych);

- w przypadku kruszyw krzemianowych (np. mieszanina popiołowo-żużlowa) oraz kruszyw węglanowych zawierających krzemiany należy zastosować przyspieszoną metodę badania

beleczek z zaprawy (AAR-2), a następnie przyspieszone badanie beleczek betonowych w temperaturze 60 °C (AAR-4.1). Wyniki badań interpretuje się po 15 tygodniach. W razie konieczności dalszych badań można stosować metody długotrwałe, opisane w dokumencie AAR-3 (badanie beleczek z zaprawy w temperaturze 38 °C). Metody przyspieszonej nie należy stosować w przypadku kruszyw potencjalnie reaktywnych, zawierających porowaty krzemień, ze względu na bardzo wolno przebiegające reakcje alkaliczne.

Wnioski

Z uwagi na obszerną tematykę, reaktywność alkaliczna kruszywa pozostaje problemem otwartym. Nadal nie jest znany wpływ różnych dodatków i domieszek do betonu na kształtowanie ekspansji alkalicznej. Kontynuowane są prace nad efektywnymi metodami badania reaktywności kruszyw, która jest szczególnie niebezpieczna, ze względu na długotrwałą i powolną destrukcję betonu. Pierwsze oznaki uszkodzeń konstrukcji betonowych mogą się pojawić nawet po kilkunastu latach.

Literatura

- [1] PN-B-06714-34+AZ1:1997 Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie reaktywności alkalicznej (wycofana 27 listopada 2012 bez zastąpienia).
- [2] PN-B-06714-46:1992 Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką.
- [3] PN-B-06714-47:1988 Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej – Oznaczenie zawartości krzemionki rozpuszczalnej w wodoro-tlenku sodowym (NaOH).
- [4] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu.
- [5] Góralczyk S.: Reaktywność alkaliczna kruszyw. Nowa europejska metodyka badań i oceny, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały nr 39, 2011.
- [6] Góralczyk S., Łukowska M.: Reaktywność alkaliczna kruszyw węglanowych – identyfikacja i środki zapobiegawcze, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały nr 41, 2012.
- [7] Titze A.: Szkody wywołane przez alkalia w betonie. Ryzyko, którego można uniknąć, Infrastruktura Transportu, 2, 2011.
- [8] Konopska-Piechurska M., Jackiewicz-Rek W.: Reaktywność alkaliczna kruszyw jako czynnik zagrażający trwałości konstrukcji betonowych w Polsce, XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna, Awaryjne Budowlane 2013.