

dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek¹⁾

Reaktywność alkaliczna kruszywa

DOI: 10.15199/33.2015.11.63

Trwałość betonu w konstrukcji zależy m.in. od jego składników, w tym decydujące znaczenie ma jakość kruszywa. Panujące powszechnie przekonanie, że zjawisko reaktywności alkalicznej kruszywa nie dotyczy Polski, może być zagrożeniem dla trwałości wykonywanych w kraju konstrukcji z betonu. Reakcja alkalia-kruszywo jest uważana na świecie za drugą w kolejności przyczynę, po korozji stali zbrojeniowej, powodującą przedwczesną destrukcję konstrukcji betonowych. Ten niszczący proces jest wynikiem reakcji wodorotlenków sodu i potasu, z roztworu w porach betonu, z reaktywną krzemionką z niektórych kruszyw. Powstający żel krzemianu sodowo-potasowo-wapniowego, absorbując wodę, pęcznieje, a ciśnienie pęcznienia po przekroczeniu wytrzymałości na rozciąganie betonu powoduje powstawanie rys i uszkodzenia elementów konstrukcji betonowej. Betony w budownictwie drogowym (nawierzchnie, elementy mostów itp.) są bardziej narażone na reakcje alkalia-kruszywo niż betony chronione podczas eksploatacji przed wilgocią i/lub zmienną temperaturą (np. beton wewnątrz budynków, stropy, posadzki).

Problem reaktywności alkalicznej kruszyw jest w ostatnim czasie popularny w związku ze zdiagnozowaniem zniszczeń na ok. 300 km autostrad w środkowych Niemczech (m.in. A14 i A9 w Saksonii-Anhalt, „landówki” w Turynii, a także jednym z dojazdów do Drezna) z powodu tzw. raka betonu. Przykłady uszkodzeń spowodowanych w wyniku reakcji alkalia-kruszywo dotyczą również krajów skandynawskich: Norwegii, Finlandii, ale także Austrii, USA, Kanady i Chin. Objawy typowe tych reakcji w postaci siatki spękań i wycieku żelu uwidaczniają się po kilku, czasem po kilkunastu latach eksploatacji konstrukcji betonowej, a niewidoczne efekty mogą być zacznym innej korozji. Niejednokrotnie w betonie obserwuje się występowanie skutków działania różnych korozyjnych mechanizmów jednocześnie oraz ich niekorzystnego synergicznego

współdziałania [1] i nie jest możliwe wtedy wskazanie jednej, właściwej przyczyny. Te same przyczyny mogą bowiem powodować różnego rodzaju uszkodzenia, a częściej odwrotnie – te same objawy mogą być wynikiem różnych oddziaływań [1]. Ważne jest, aby już na etapie projektowania konstrukcji z betonu odpowiednio przewidzieć wszystkie możliwe skutki jego ekspozycji, a tym samym zabezpieczyć konstrukcję przed korozją, również przed reakcjami alkalicznymi kruszywa, tym bardziej że *wszystkie kruszywa reagują z alkalią; różnią się tylko rodzajem reakcji, szybkością jej przebiegu i stopniem przemiany* [2].

Reakcja alkaliczna kruszywa

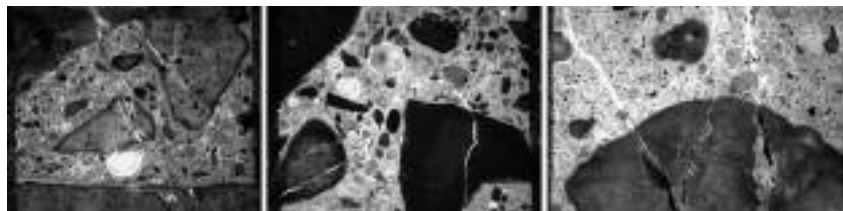
Reakcje alkaliczne kruszywa (z ang. *AAR, Alkali Aggregate Reaction*) zachodzą pomiędzy składnikami betonu. Są to reakcje reaktywnej krzemionki z wodorotlenkiem sodu i potasu z wytworzeniem żelu niestechiometrycznego uwodnionego krzemianu, zawierającego zmienną ilość kationów Na^+ , K^+ i Ca^{2+} , a ich skutkiem jest pęcznienie reagującego kruszywa. Niektóre rodzaje krzemionki koloidalnej (reaktywna krzemionka) reagują z alkalią zawartymi w cemencie i tworzą żel wokół ziaren kruszywa [3]. Żel ten pęcznieje pod wpływem wilgoci, co prowadzi do powstania naprężeń powodujących zarysowania betonu. Wiele rys spowodowanych przez reakcję w betonie przechodzi przez pojedyncze ziarna kruszywa, ale też przez otaczający je zhydratyzowany czynnik cementowy (fotografia). Zjawisku często towarzyszy pojawienie się wykwitów i nacieków na powierzchni betonu. AAR najczęściej diagnozowana jest w betonach z kruszywem krzemionkowym (reakcje alkalia-krzemionka, z ang. ASR) lub z kru-

szywem węglanowym (reakcja alkalia-węglany, z ang. ACR). Mikrostruktura zarysowania powierzchni, będąca skutkiem reakcji alkaliów z aktywną krzemionką, jest nieregularna i przypomina dużą pajęczynę. Nie jest łatwo odróżnić ją od mikrostruktury zarysowań spowodowanych atakiem siarczanowym, zamrażaniem i rozmrażaniem lub też znacznym skurczem plastycznym [4]. Aby wystąpiła reakcja alkalia-krzemionka, muszą być spełnione trzy warunki: 1) kruszywo z reaktywnymi formami krzemionki (np. opal, chalcedon, trydymit, kryptokrystaliczny kwarc – nietrawne w środowisku zasadowym o wysokim pH); 2) alkalia w znacznej (wysokie pH); 3) odpowiednia wilgotność i temperatura (rysunek 1).



Rys. 1. Warunki występowania reakcji alkalicznej kruszywa

Reaktywne kruszywa. Wiele rodzajów kruszyw naturalnych jest zdolnych do reakcji z roztworami alkalicznymi, a ich reaktywność jest funkcją rodzaju składników tworzących kruszywo. Kruszywa, których duża powierzchnia jest porowata, szklista – są bardziej podatne na omawiane reakcje. Do skał zawierających krytyczne ilości potencjalnie reaktywnych form krzemionkowych należą: rogowiec i krzemień zawierające chalcedon, skały wulkaniczne



Charakterystyczne cechy ASR zaobserwowane na złgladach betonowych – mikrorysy w ziarnach kruszywa i w zaczynie cementowym wypełnione produktami reakcji [5]

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej; e-mail: wjr.@il.pw.edu.pl

(melafir, andezyt, porfir, bazalt oliwinowy); tufy wulkaniczne; szkliwo wulkaniczne; piaskowce o spoiwie ilastym; krzemionkowym; łupki ilasto-mikowe; kwarcyty; szarogłazy; fyllity; granity i granodioryty oraz gnejsy.

Alkalia. Ogólna zawartość alkaliów w betonie powinna być obliczana z uwzględnieniem wszystkich składników betonu, również rozpuszczalnych w wodzie związków sodu i potasu. Zazwyczaj jednak brana jest pod uwagę tylko zawartość alkaliów w cemencie, podawana jako równoważna zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$). W przypadku ryzyka potencjalnej reaktywności, w niektórych krajach europejskich i Kanadzie, przyjmuje się dopuszczalny limit zawartości alkaliów 3 kg/m^3 betonu [6].

Wilgotność. Żel uwodnionego krzemianu sodowo-potasowego, z niewielką zawartością wapnia, absorbuje cząsteczki wody, a to prowadzi do jego pęcznienia. Z tego powodu, szkodliwe reakcje nie zachodzą w warunkach suchych, lecz dopiero wówczas, gdy wilgotność betonu przekroczy 80%. Zmniejszenie przepuszczalności betonu przez redukcję w/c, czy stosowanie dodatków mineralnych, utrudnia transport wilgoci i zapobiega szkodliwym reakcjom.

Temperatura. W cieplejszym klimacie betony są bardziej podatne na ASR niż w chłodniejszym, ponieważ szybkość reakcji wzrasta wraz ze wzrostem temperatury (prawo Arrheniusa). W przypadku większości kruszyw, wyższa temperatura oznacza również większe pęcznienie.

Literatura dotycząca mechanizmów reakcji, szczególnie niebezpiecznych reaktywnych minerałów w kruszywach, jak i środków ostrożności podejmowanych w celu zapobiegania występowaniu reakcji – **wciąż nie wyjaśnia kompleksowo AAR**. Najnowsze publikacje dotyczą zarówno rozwoju metod badawczych (poszukiwanie niekonwencjonalnych metod, np. nieniszczących, dylatometrycznych, analiza obrazu SEM, pozwalających na szacowanie skutków korozji), ochrony przed korozją przez dobór składu betonu i matematycznego modelowania postępu oraz zasięgu AAR w czasie i wpływu tego postępu na cechy mechaniczne z uwzględnieniem zmian w mikrostrukturze. Opinie wielu autorów dotyczące stosowania metod identyfikacji potencjalnej reaktywności oraz naprawy uszkodzonych konstrukcji, czy też kontroli skutków reakcji w konstrukcjach już istniejących, są jednoznaczne.

Badania reaktywności alkalicznej kruszyw

Zgodnie z PN-EN 12620+A1:2010 [7] *Jeśli jest to wymagane, reaktywność alkaliczno-krzemionkową kruszyw należy oceniać zgodnie z postanowieniami ważnymi w miejscu zastosowania, a wyniki deklarować.* W Polsce, w związku z brakiem wskazań dotyczących metod badania (brak uzupełnienia krajowego do PN-EN 12620 [7]) stosowane są dwie metody wg polskich norm:

1) PN-B-06714-34:1991 *Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie reaktywności alkalicznej* [8] (norma wycofana 27 listopada 2012 r. bez zastąpienia) – badanie polega na ustaleniu zmian liniowych oraz zmian destrukcyjnych beleczek betonowych (rysy, pęknięcia, zmiany barwy, wykwyty, wycieki, odpryski);

2) PN-B-06714-46:1992 *Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką* [9] – badanie polega na przeprowadzeniu reakcji kruszywa z wodorotlenkiem sodu i oznaczeniu ubytku masy kruszywa oraz określeniu zawartości reaktywnej krzemionki (metoda ta jest najczęściej stosowana ze względu na bardzo krótki czas badania).

Schemat oceny i postępowania przy określaniu reaktywności alkalicznej kruszyw wg norm polskich (przyjęty również do betonu nawierzchniowego wg Ogólnych Specyfikacji Technicznych zatwierdzonych w 2014 r.) przedstawiono na rysunku 2. Bardzo podobne metody przy ocenie reaktywności alkalicznej kruszyw istnieją w Niemczech.

Wykorzystywana do wstępnej (szybkiej) oceny krajowych kruszyw PN-B-06714-46 pozwala jedynie na zgrubne określenie reaktywności kruszywa. Metody badawcze reaktywności kruszywa w warunkach zbliżonych do eksploatacji i dające bardziej wiarygodne wyniki (np. wg normy PN-B-06714-34) polegają na długim badaniu zmian liniowych próbek betonowych lub zapraw. Być może dobrym rozwiązaniem

byłoby stosowanie nowych metod badań, wraz z kryteriami oceny reaktywności alkalicznej opracowanych w ramach prac Komitetów Technicznych RILEM (TC 191 oraz TC 219) [10]. Próbę porównania głównych założeń i kryteriów oceny wg norm polskich i dokumentów RILEM podano w tabeli 1.

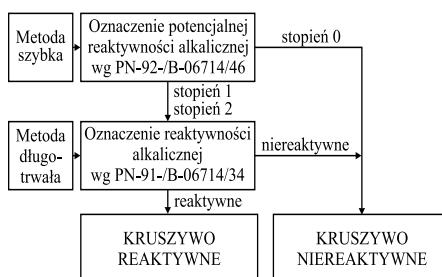
Podstawową metodą badawczą, wg dokumentów RILEM, służącą do oceny kruszywa pod względem reaktywności jest badanie petrograficzne metodą AAR-1. Na jej podstawie, w zależności od stwierdzonego stopnia reaktywności kruszywa – klasy, stosuje się odpowiednią metodę badawczą w celu dalszego rozpoznania i oceny kruszywa (metody AAR-2, AAR-3, AAR-4.1 lub AAR-5). Obecnie do oceny reaktywności kruszywa, obok metod RILEM, wykorzystywane są normy ASTM (C1260, C1293, C295, C586, C1105, C1567).

Zapobieganie reakcjom alkalicznym kruszywa

Reaktywność alkaliczna kruszyw mineralnych może spowodować szybką destrukcję betonu. Ten rodzaj korozji wewnętrznej przebiega jednocześnie w całej objętości betonu. Można przeciwdziałać AAR poprzez odpowiednie projektowanie składu betonu, ograniczając ilość substratów tej reakcji, np. zastosować kruszywo niereaktywne lub cement niskoalkaliczny, NA lub dodatki mineralne i domieszki chemiczne przeciwdziałające reakcji z alkaliom. Rozwiązaniem mogą być takie dodatki, jak zeolity [11,12], popioły lotne [13÷15], czy też związki litu [16÷18]. Postępowanie takie jest konieczne, gdyż reakcja alkaliów z kruszywem powoduje zarówno pogorszenie właściwości betonu, jak i zwiększenie jego przepuszczalności, ułatwiając tym samym migrację innych czynników korozyjnych.

Problem reaktywności alkalicznej kruszyw dodatkowo komplikuje fakt, że w przypadku różnych kruszyw może się ona odmiennie objawiać. Zwykle wyróżnia się trzy rodzaje reakcji: alkalia-krzemionka; alkalia-krzemiany i alkalia-węglany. Różnią się one między sobą kinetyką przebiegu. Odmiennie są także metody pozwalające zapobiegać tym reakcjom na etapie projektowania składu betonu.

Zalecenia zastosowania cementu niskoalkalicznego, zawarte w specyfikacjach technicznych dla betonu o wymaganej odporności na reakcję alkalia-kruszywo, nie gwarantują jednak pełnego zabezpieczenia przed wystąpieniem szkodliwej reakcji,



Rys. 2. Schemat oceny reaktywności kruszyw wg norm polskich

Porównanie założeń oceny reaktywności alkalicznej kruszyw według norm PN-B i dokumentów RILEM [19]

Normy/Wytyczne	PN-B	RILEM	
1. BADANIE KRUSZYW			
1.1. Dokument	PN-B-06714-46	AAR-1	
1.2. Warunki i opis badania	temperatura 90 °C, środowisko – roztwór NaOH: dla kruszyw do 4,0 mm – 4%, dla kruszyw do 63,0 mm – 10%	badanie petrograficzne	
1.3. Czas badania	1 godz.	–	
1.4. Ocena	zakwalifikowanie kruszywa do odpowiedniego stopnia reaktywności kruszywa: (stopień 0 – niereaktywne, stopień 1 – potencjalnie reaktywne, stopień 2 – reaktywne) w wyniku ubytku masy i zawartości reaktywnych krzemieni	zakwalifikowanie kruszywa do odpowiedniej klasy reaktywności kruszywa (klasa I – niereaktywne, klasa II – potencjalnie reaktywne, klasa III – bardzo reaktywne) oraz typu reakcji (ASR lub ACR)	
2. BADANIE BELECZEK ZAPRAW			
2.1. Dokument		AAR-2	
2.2. Warunki i opis badania	brak	temperatura 80 °C, środowisko – roztwór 1M NaOH	
2.3. Czas badania		14 dni	
2.4. Ocena		kruszywo potencjalnie reaktywne: wydłużenie beleczek: 40 x 40 x 160 mm > 0,8%; 25 x 25 x 285 mm > 0,1 %;	
3. BADANIE BELECZEK BETONU			
3.1. Dokument	PN-B-06714-34	AAR-4.1	AAR-3
3.2. Warunki i opis badania	temperatura 36°C – 40 °C, środowisko – przechowywanie nad wodą, beleczki 25 x 25 x 250 mm	temperatura 60 °C, środowisko – przechowywanie w wodzie, beleczki 75 x 75 x 250 mm	temperatura 38 °C, środowisko – wilgotność min. 90%, beleczki 75 x 75 x 250 mm
3.3. Cement	cement o zawartości reaktywnych alkaliów 1,2% Na ₂ O _{eq} w stosunku do masy cementu	cement o zawartości reaktywnych alkaliów powyżej 1,15% Na ₂ O _{eq} w stosunku do masy cementu	cement o dużej zawartości alkaliów
3.4. Czas badania	180 dni	15 tygodni	1 rok
3.5. Ocena	wartość ekspansji liniowej beleczek < 0,1% – kruszywo niereaktywne	rozszerzalność liniowa > 0,03% – reaktywne kruszywo	kryteria dla rozszerzalności liniowej: kruszywo niereaktywne < 0,05%; potencjalnie reaktywne 0,05% – 0,1%; kruszywo reaktywne > 0,1%

gdyż alkalia mogą pochodzić np. z kruszywa lub środowiska zewnętrznego. Natomiast zastosowanie spoiw z dodatkami mineralnymi pozwala na zmniejszenie zawartości alkaliów w roztworze porowym betonu oraz uzyskanie bardziej szczelnej mikrostruktury utrudniającej migrację alkaliów do reaktywnego kruszywa i zabezpieczającej beton przed innymi oddziaływaniami korozyjnymi.

Podsumowanie

Na podstawie doświadczeń niemieckich z ostatniego dziesięciolecia oraz formułowanych w kraju sugestii o występowaniu uszkodzeń konstrukcji w wyniku korozji alkalia-kruszywo można stwierdzić, że istnieje zagrożenie tym zjawiskiem w naszej strefie klimatycznej i surowcowej. Świadome marginalizowanie tego problemu w ocenie krajowych kruszyw uniemożliwia podejmowanie właściwych kroków na etapie projektowania składu betonu. Znane są na terenie Polski przypadki skał reaktywnych, które mogą być lub są pozyskiwane jako kruszywo mineralne do betonu. Stopień reaktywności kruszywa nie zawsze jest cechą stałą dla złoża i może się zmieniać wraz z postępem jego eksploatacji. Z tej przyczyny zachodzi **potrzeba sta-**

lego monitoringu reaktywności pozyskiwanego kruszywa wraz z eksploatacją złoża.

Literatura

- [1] Czarniecki L., Emmons P. H., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, 2002.
- [2] Góralczyk S., Reaktywność alkaliczna kruszyw. Nowa europejska metodyka badań i oceny, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały nr 39, 2011.
- [3] Kurdowski W.: Chemia cementu i betonu, Polski Cement, 2010.
- [4] Neville A. M.: Właściwości betonu, Polski Cement, 2012.
- [5] Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book, U. S. Department of Transportation, Report no. FHWA-HIF-13-019.
- [6] ACI 221.1R-98 State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity Reported by ACI Committee 221.
- [7] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu.
- [8] PN-B-06714-34+AZ1:1997 Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie reaktywności alkalicznej [wycofana 27 listopada 2012 bez zastąpienia].
- [9] PN-B-06714-46:1992 Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką.
- [10] Nixon P. J., Lindgård J., Borchers I., Wigum B. J., Schouenborg B., The EU „Partner” Project - European Standard Tests to Prevent Alkali Reactions in Aggregates Final Results and Recommendations, 2008.
- [11] Karakurt C., Topcu I. B., Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate re-

sistance of concrete, Construction and Building Materials 25 (2011) 1789 – 1795.

[12] Owsiak Z., Czapiak P., Wpływ dodatku zeolitu na reakcję alkaliów z krzemionką w zaprawach z kruszywem reaktywnym, Mat. Konf. „Dni Betonu 2014”, s. 587 – 596.

[13] Wright J. R., Shafaatian S., Rajabipour F., Reliability of chemical index model in determining fly ash effectiveness against alkali-silica reaction induced by highly reactive glass aggregates, Construction and Building Materials 64 (2014) 166 – 171.

[14] Shafaatian S. M. H., Akhavan A., Maraghechi H., Rajabipour F., How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)?, Cement & Concrete Composites 37 (2013) 143 – 153.

[15] Thomas M., Dunster A., Nixon P., Blackwell B., Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction – Exposure site studies, Cement & Concrete Composites 33 (2011) 359 – 367.

[16] Leemann A., Lörtscher L., Bernard L., Le Saout G., Lothenbach B., Espinosa-Marzal R. M., Mitigation of ASR by the use of LiNO₃ – Characterization of the reaction products, Cement and Concrete Research 59 (2014) 73 – 86.

[17] Demir, M. Arslan, The mechanical and microstructural properties of Li₂SO₄, LiNO₃, Li₂CO₃ and LiBr added mortars exposed to alkali-silica reaction, Construction and Building Materials 42 (2013) 64 – 77.

[18] Owsiak Z., Zapala-Sławeta J.: „The lithium nitrate effect on the concrete expansion caused by ASR in concrete of gravel aggregate”, Cement Wapno Beton 20 (1), (2015), s. 25 – 31.

[19] Konopska-Piechurska M., Jackiewicz-Rek W., Reaktywność alkaliczna kruszywa jako czynnik zagrożający trwałości konstrukcji betonowych w Polsce, XXVI Awaria Budowlane 2013, 833 – 842.

Przyjęto do druku: 01.10.2015 r.