MAŁGORZTA KONOPSKA-PIECHURSKA, *malgorzata.konopska-piechurska@tpaqi.com*
TPA Instytut Badań Technicznych Sp. z o.o.
WIOLETTA JACKIEWICZ-REK, *w.jackiewicz-rek@il.pw.edu.pl*
Politechnika Warszawska

REAKTYWNOŚĆ ALKALICZNA KRUSZYW JAKO CZYNNIK ZAGRAŻAJĄCY TRWAŁOŚCI KONSTRUKCJI BETONOWYCH W POLSCE

ALKALINE AGGREGATES REACTIVITY AS THE HAZARDOUS FACTOR ON CONCRETE STRUCTURES DURABILITY IN POLAND

Streszczenie W artykule podjęto rozważania dotyczące reaktywności alkalicznej kruszyw, będącej jednym z czynników, mogącym zagrażać trwałości konstrukcji betonowych w Polsce. Przeanalizowano warunki w jakich zachodzi reakcja alkaliczna kruszywa oraz metody oceny i badania tego zjawiska. Szczególną uwagę zwrócono na zapisy zabezpieczające przed korozją alkaliczną betonu w Specyfikacjach Technicznych oraz wskazano trudności, wątpliwości i problemy związane z zagadnieniem reaktywności alkalicznej kruszyw w Polsce.

Abstract The article elaborates the alkali aggregate reactivity is one of the factors that could be hazardous factor on concrete structures in Poland. The conditions, methods of evaluation and testing of alkaline aggregate reactivity were analyzed. Particular attention was given to concrete protection against alkaline corrosion in the Technical Specifications and problems associated with alkali aggregate reactivity in Poland.

1. Wstęp

Problem reaktywności alkalicznej kruszyw jest kontrowersyjny, a zarazem trudny do zdefiniowania w warunkach polskich. Czy sam fakt, iż w ostatnich latach nie zdiagnozowano spektakularnych przypadków uszkodzeń, czy destrukcji konstrukcji z betonu w wyniku niszczącej reakcji alkalia-kruszywo, świadczy o tym, że problem nie dotyczy Polski? Czy wynika z tego, że wszystkie kruszywa w Polsce są niereaktywne? Czy w Polsce bada się potencjalną reaktywność kruszyw, a jeśli tak, to czy badania te są miarodajne? Czy w końcu, w specyfikacjach betonu pojawiają się odpowiednie zapisy chroniące konstrukcje, szczególnie narażone, przed możliwością destrukcji w wyniku reakcji alkalicznej kruszyw i kiedy zaostrzone wymaganie nie są przesadzone?

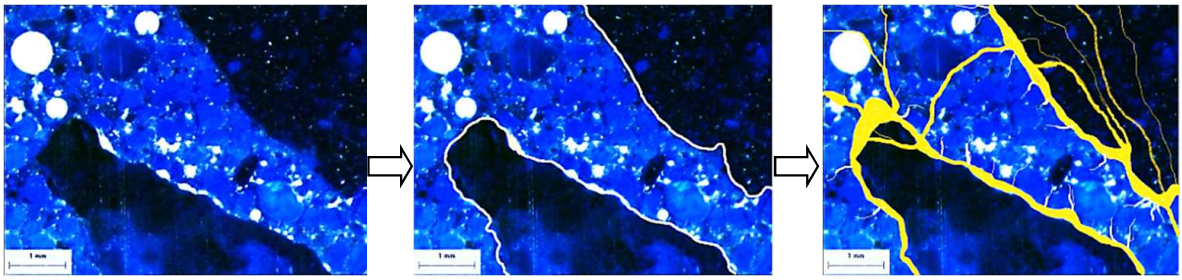
Niejednokrotnie w betonie obserwujemy występowanie skutków działania różnych korozyjnych mechanizmów równocześnie i ich niekorzystnego synergicznego współdziałania [1]. Trudność stanowi wtedy wskazanie jednej, właściwej przyczyny. Bowiem te same przyczyny mogą powodować różnego rodzaju uszkodzenia, a 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, tam gdzie jest to niezbędne, bo przecież „wszystkie kruszywa reagują z alkaliami; różnią się tylko rodzajem reakcji, szybkością jej przebiegu i stopniem przemiany” [2].

Autorki referatu, podczas jego opracowywania napotkały na szereg wątpliwości, które wynikają z praktyki inżynierskiej w podjętym zakresie tematycznym. Referat jest próbą usystematyzowania najważniejszych problemów technologicznych dotyczących specyfikowania wymaganych cech składników betonu przeznaczonego do konstrukcji szczególnie narażonych na reakcję alkalia-kruszywo (tj. nawierzchni, oczyszczalni ścieków, mostów itp.), badania reaktywności alkalicznej kruszyw oraz identyfikacji skutków korozji wywołanej reakcją alkalia-kruszywo.

2. Warunki reakcji alkalicznej kruszywa

Reakcje alkaliczne kruszywa (z ang. *AAR, Alkali Aggregate Reaction*) zachodzą pomiędzy składnikami betonu, a ich skutkiem jest pęcznienie reagującego kruszywa. Niektóre rodzaje krzemionki koloidalnej (reaktywna krzemionka) reagują z alkaliami zawartymi w cemencie i tworzą żel wokół ziaren kruszywa [1]. Żel ten pęcznieje pod wpływem wilgoci, co prowadzi do powstania naprężeń powodujących zarysowania betonu (rys. 1). Wiele rys spowodowanych przez reakcję w betonie przechodzi przez pojedyncze ziarna kruszywa, ale też przez otaczający je zhydratyzowany zaczyn cementowy [3]. Zjawisku często towarzyszy pojawienie się wykwitów i nacieków na powierzchni betonu. Reakcje te zwykle nie są główną przyczyną zniszczenia struktury, jednakże znacznie zmniejszają trwałość betonu w wyniku zarysowań sprzyjających karbonatyzacji, czy korozji chlorkowej powodującej korozję zbrojenia.



Rys. 1. Schemat mechanizmu niszczenia betonu na skutek reakcji alkalicznej kruszywa wg Autorek

AAR najczęściej diagnozowana jest w betonach z kruszywem krzemionkowym (reakcje alkalia-krzemionka, z ang. *ASR*) lub z kruszywem węglanowym (reakcja alkalia-węglany, z ang. *ACR*), a nieprzestrzeganie odpowiednich środków ostrożności może doprowadzić do stopniowego niszczenia, wymagającego kosztownej naprawy konstrukcji z betonu w celu utrzymania jej założonej funkcji [4÷5].

Mikrostruktura zarysowania powierzchni, będąca skutkiem reakcji alkaliów z aktywną krzemionką jest nieregularna i przypomina dużą pajęczynę. Według Neville’a [3] nie jest łatwo odróżnić ją od mikrostruktury zarysowań spowodowanych atakiem siarczanowym, zamrażaniem i odmrażaniem lub też znacznym skurczem plastycznym.

Aby wystąpiła reakcja alkalia-krzemionka, muszą być spełnione trzy warunki: 1. kruszywo z reaktywnymi formami krzemionki (opal, chalcedon, trydymit, kryptokrystaliczny kwarc – nietrwałe w środowisku zasadowym z wysokim pH), 2. alkalia w zaczynie (wysokie pH), 3. odpowiednia wilgotność (rys. 2).

Reaktywne kruszywa

Wiele rodzajów kruszyw naturalnych jest zdolnych do interakcji z roztworami alkalicznymi, a ich reaktywność jest funkcją typu i formy składników tworzących kruszywo. Kruszywa, których duża powierzchnia jest porowata, szklista – są bardziej podatne na reakcje. Do skał

zawierających krytyczne ilości potencjalnie reaktywnych form krzemionkowych należą: rogowiec i krzemień zawierające chalcedon, skały wulkaniczne, takie jak ryolit, andezyt, porfiry, tufy, łupków, piaskowiec, kwarcyt, krzemionkowe skały węglanowe, szarogłazy, fyllity, granity i granodioryty oraz gnejsy.

Alkalia

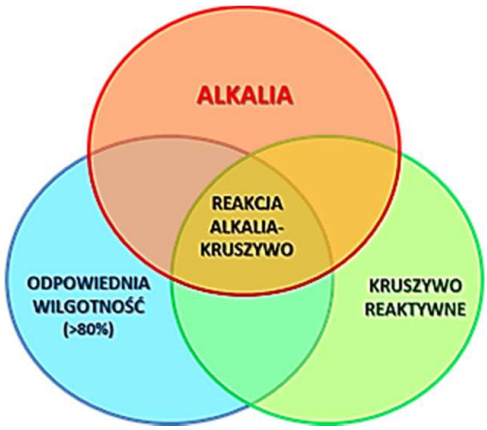
Ogólna zawartość alkaliów w betonie powinna być zliczana przy uwzględnieniu wszystkich składników betonu. Zazwyczaj jednak, brana jest pod uwagę jedynie zawartość alkaliów w cemencie, podawana jako równoważna zawartość Na_2O_{eq} ($Na_2O_{eq} = Na_2O + 0.658\ K_2O$). W przypadku ryzyka potencjalnej reaktywności, w niektórych krajach europejskich i Kanadzie, przyjmuje się dopuszczalny limit zawartości alkaliów 3 kg/m^3 betonu [5].

Wilgotność

Żel pochłania wilgoć, a to prowadzi do pęcznienia. Z tego powodu, szkodliwe reakcje nie zachodzą w warunkach suchych, a badania wykazują, że dopiero, gdy wilgotność przekroczy 80%. Zmniejszenie przepuszczalności betonu, poprzez redukcję w/c, czy stosowanie dodatków mineralnych, utrudnia transport wilgoci i zapobiega szkodliwym reakcjom.

Temperatura

Betony w cieplejszym klimacie są bardziej podatne na ASR niż w chłodniejszym klimacie, ponieważ szybkość reakcji zwykle wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. W przypadku większości kruszyw, wyższe temperatury oznaczają również większe pęcznienie.



Rys. 2. Warunki występowania reakcji alkalicznej kruszywa

Dostępne informacje [1÷22] dotyczące mechanizmów reakcji, szczególnie niebezpiecznych reaktywnych minerałów w kruszywach, jak i środków ostrożności podejmowanych w celu zapobiegania występowaniu reakcji – wciąż nie wyjaśnia kompleksowo zarówno ASR jak i ACR. Szczególne braki zauważalne są w zakresie stosowania metod identyfikacji potencjalnej reaktywności, metod napraw uszkodzonych konstrukcji, czy też kontroli skutków reakcji w konstrukcjach już istniejących [5].

3. Metody oceny i badania reaktywności alkalicznej kruszyw

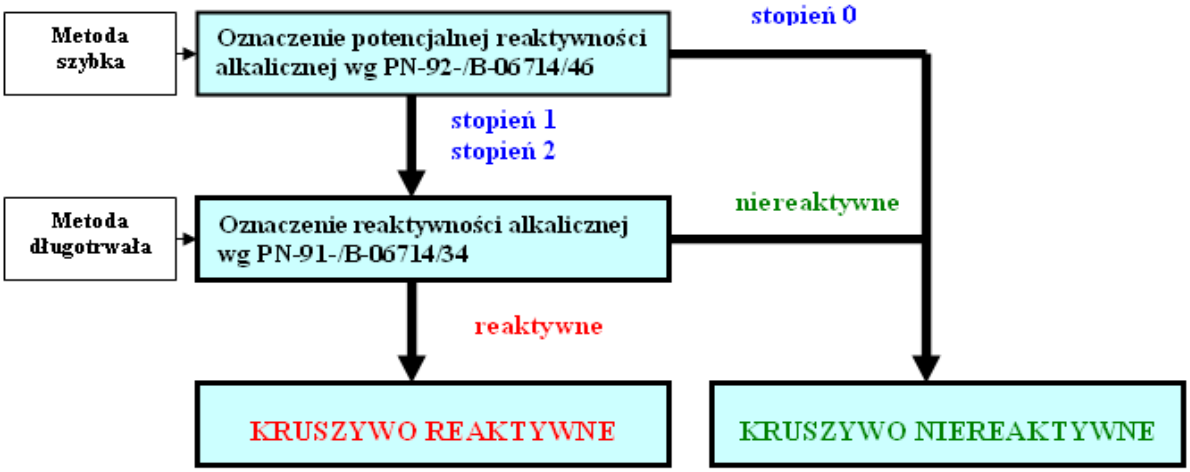
Reaktywność alkaliczna kruszyw jest zjawiskiem złożonym, pod względem typów reakcji alkalicznych, jak i różnorodności czynników mineralogicznych, chemicznych i atmosferycznych (zwłaszcza zmienna temperatura i wilgotność) wpływających na ich wystąpienie i przebieg [6]. W zależności od powyższych zjawisk metody badań oraz kryteria oceny zjawiska reaktywności alkalicznej są różne, a ich ujednolicenie jest bardzo trudne [6].

Zgodnie z normą 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 normy PN-EN 12620 [7]) stosowane są trzy metody według polskich norm:

1. PN–B 06714-34:1991 Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie reaktywności alkalicznej [8] (norma wycofana 27 listopada 2012 bez zastąpienia) – badanie polega na ustaleniu zmian liniowych oraz zmian destrukcyjnych beleczek betonowych (rysy, pęknięcia, zmiany barwy, wykwity, wycieki, odpryski). Norma uwzględnia ekstremalne warunki oddziaływania alkaliów na kruszywo. Norma określa skład ilościowy kruszywa przeznaczonego do badań oraz cementu o zawartości alkaliów 1,2 ± 0,1% (w przeliczeniu na Na_2O) i warunki przechowywania: wilgotne w temperaturze 36÷40°C.
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.
3. PN–B 06714-47:1988 Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej [10] – oznaczenie zawartości krzemionki rozpuszczalnej w wodorotlenku sodowym (NaOH) – badanie polega na określeniu metodą masową zawartości krzemionki rozpuszczalnej po reakcji odpowiednio przygotowanej próbki kruszywa z roztworem wodorotlenku sodowego, o stałym stężeniu c(NaOH) = 1 mol/1, w temperaturze 80°C w ciągu 24 h. Metoda ta jest rzadko stosowana.

W praktyce w Polsce używa się dwóch metod oceny reaktywności alkalicznej: wg normy PN-B-06714-46 [9] oraz normy PN-B-06714-34 [8]. Schemat oceny i postępowania przy określaniu reaktywność alkalicznej kruszyw według norm polskich przedstawiono na rys. 3. Bardzo podobny do polskiego schematu postępowania przy ocenie reaktywności alkalicznej kruszyw można znaleźć w Niemczech, gdzie stosowana jest Dyrektywa „Działania zapobiegające szkodliwej reakcji alkalicznej w betonie” [11], która uwzględnia kompleksowe podejście do problemu reaktywności alkalicznej łącznie ze wskazaniem przykładów kruszyw, które nie powinny być stosowane ze względu na swoją reaktywność.



Rys. 3. Schemat oceny reaktywności kruszyw według norm polskich

Tablica 1. Porównanie założeń oceny reaktywności alkalicznej kruszyw według norm PN-B i dokumentów RILEM

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 kruszywa do 4,0 mm – 4%; dla kruszywa do 63,0 mm – 10%	Badanie petrograficzne	
1.3. Czas badania	1 godz.	—	
1.4. Ocena	Zakwalifikowanie kruszywa do odpowiedniego stopnia reaktywności (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	Brak	**AAR-2**	**AAR-3**
2.2. Warunki i opis badania		Temperatura 80°C, środowisko – roztwór 1 M NaOH	Temperatura 38°C, środowisko – wilgotność min. 90%
2.3. Czas badania		14 dni	1 rok
2.4. Ocena		Kruszywo potencjalnie reaktywne: wydłużenie beleczek: 40×40×160 mm > 0,8%; 25×25×285 mm > 0,1%;	Kryteria dla rozszerzalności liniowej: kruszywo niereaktywne < 0,05%; potencjalnie reaktywne 0,05÷0,1%; kruszywo reaktywne > 0,1%
3. BADANIE BELECZEK BETONU			
3.1. Dokument	**PN-B-06714-34**	**AAR-4.1**	
3.2. Warunki i opis badania	Temperatura 36÷40°C, środowisko – przechowywanie nad wodą, beleczki 25×25×250 mm	Temperatura 60°C, środowisko – przechowywanie w wodzie, beleczki 75×75×250 mm	
3.3. Cement	Cement o zawartości reaktywnych alkaliów 1,2% Na_2O_{eq} w stosunku do masy cementu	Cement o zawartości reaktywnych alkaliów powyżej 1,15% Na_2O_{eq} w stosunku do masy cementu	
3.4. Czas badania	180 dni	15 tygodni	
3.5. Ocena	Wartość ekspansji liniowej beleczek < 0,1% – kruszywo niereaktywne	Rozszerzalność liniowa > 0,03% – kruszywo reaktywne	

Metody stosowane w Polsce nie do końca skutecznie oceniają reaktywność kruszyw [6]. Szczególnie dotyczy to reakcji alkalia-węglany (ACR) oraz tzw. reakcji powolnych zachodzących w kruszywach z mniejszą intensywnością np. reakcji alkalia-krzemiany. 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 RILEM TC 219) [12].

Próbę porównania głównych założeń i kryteriów oceny wg norm polskich i dokumentów RILEM zestawiono w tablicy nr. 1.

Podstawową metodą badawczą, według dokumentów RILEM, służącą do oceny i kwalifikacji kruszywa pod względem reaktywności jest badanie petrograficzne według metody AAR-1. Na jej podstawie, w zależności od stwierdzonego stopnia reaktywności kruszywa – klasy, stosuje się odpowiednią metodę badawczą dla dalszego rozpoznania i oceny kruszywa (metody AAR-2, AAR-3, AAR-4.1 lub AAR-5 dla kruszyw ze skał węglanowych).

4. Reaktywność alkaliczna kruszyw w specyfikacjach betonu

Kluczowe znaczenie dla zapewnienia trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji z betonu, w przewidywanym długim okresie użytkowania, ma specyfikacja betonu, będąca częścią dokumentacji projektowej. Szczególnej uwagi wymaga prawidłowe formułowanie specyfikacji wymagań odnośnie do betonu, również przy uwzględnieniu efektywności ekonomicznej przyjętego rozwiązania. Niewłaściwe formułowanie specyfikacji jest sprzeczne z zasadami zrównoważonego rozwoju i prowadzi niejednokrotnie do nieporozumień i kłopotów realizacyjnych oraz marnotrawstwa [13].

Autorki referatu przeanalizowały kilkadziesiąt specyfikacji technicznych pod kątem zawartych w nich zapisów dotyczących reaktywności alkalicznej. Najczęściej występującym zapisem w specyfikacjach, mającym na celu ochronę betonu w konstrukcji przed reaktywnością alkaliczną kruszywa, jest wymaganie dotyczące stosowania niskoalkalicznego cementu (NA) i nieaktywnego kruszywa (tablica 2). W praktyce inżynierskiej, szczególnie po stronie wykonawców pojawiają się zastrzeżenia co do tak ostrych wymagań zawartych w specyfikacjach technicznych (ST), podważające słuszność i cel zapisanych wymagań. Szczególnie dotyczy to przypadków, gdy stosowane jest kruszywo o udokumentowanej jakości – kruszywo niereaktywne alkalicznie, a dodatkowo wymagane jest zastosowanie cementu niskoalkalicznego NA (generujące dodatkowe koszty).

Niestety w specyfikacjach technicznych betonu, w odniesieniu do wymagań reaktywności alkalicznej pojawiają się błędne zapisy, które mogą powodować trudności w interpretacji wymagań specyfikacji i jej wdrożenia. Najczęściej występujące błędy związane są z interpretacją wyników wymaganych badań według wskazanych metod. Przykładowo – Badanie reaktywności alkaliczno-krzemionkowej wg PN-B-06714-34, wymaganie – stopień reaktywności 0.

Według przywołanej metody badań według PN-B-06714-34[8] można określić zmiany liniowe i na tej podstawie ocenić reaktywność kruszywa; stopnie reaktywności są wynikiem badania według metody zawartej w PN-B-06714-46 [9] – Badanie reaktywności alkaliczno-krzemionkowej, wymaganie – stopień reaktywności 0,5.

Nie ma możliwości określenie wymaganego stopnia reaktywności 0,5 według PN-B-06714-46 [9] – według tej metody kruszywo może mieć stopień reaktywności 0, stopień 1 lub stopień 2.

Pewnym nadużyciem wymagań zawartych w specyfikacji jest często pojawiający się wymóg badania reaktywności alkalicznej kruszywa według dwóch norm PN-B-06714-46 (metoda szybka) [9] i PN-B-06714-34 (metoda długotrwała) [8], bez względu na wynik badania kruszywa uzyskany metodą szybką (rys. 3).

5. Trudności, wątpliwości, problemy

Powszechne przekonanie, iż reaktywność alkaliczna kruszywa jest jednym z najrzadszych mechanizmów niszczenia betonu, nie jest typowe jedynie dla Polski. Potwierdził to również raport, opublikowany w Finlandii, w 2012 roku [4], w którym poddano w wątpliwość dotychczasowe mniemanie Finów, iż reakcja alkalia-kruszywo w betonie nie zagraża konstrukcjom

w Finlandii, ze względu na wyjątkowo dobrą jakość skał; 50 zidentyfikowanych przypadków AAR w ciągu ostatnich 15 lat, wzbudziło duże obawy dotyczące zasięgu problemu.

W Polsce trudności związane ze skutecznym przeciwdziałaniem występowaniu problemu reaktywności alkalicznej w konstrukcjach z betonu można odnaleźć na różnych polach, przykładowo:

Metoda badania reaktywności alkalicznej kruszyw

Podstawowa metoda badania reaktywności alkalicznej wg normy PN-B-06714-34[8], do której odwołuje się większość ST, zawiera zapisy budzące wiele wątpliwości, które niewątpliwie mogą wpłynąć na wynik badania i w konsekwencji ocenę reaktywności kruszywa. Norma wymaga zastosowania cementu marki 35 portlandzkiego o zawartości alkaliów 1,2±0,1% w przeliczeniu na Na_2O_{eq}. Wymagane oznaczenie cementu – marka 35 już nie istnieje, w praktyce stosowany jest cement 32,5 lub 42,5. Podobnie w przypadku zawartości alkaliów, cementy produkowane w Polsce charakteryzują się zawartością alkaliów rzędu 0,8%. W konsekwencji, do badań stosowane są cementy o innych parametrach niż wymaga tego norma, co wpływa na wynik badania.

Często według przytoczonej normy [8] sprawdzane są możliwe reakcje z kruszywem innych rodzajów cementów niż portlandzki. Sprawdzane cementy mogą być różnej klasy wytrzymałości, jak również mają zawartość alkaliów znacznie niższą niż zakłada norma. Przytoczone problemy mogą budzić wątpliwości: czy właściwie specyfikujemy i badamy zjawisko reaktywności alkalicznej i na ile uzyskane wyniki są miarodajne?

Problem oceny

W załączniku A1 do normy PN-B-06714-34[8] zmienił się sposób oceny; skrócono czas badania z 360÷180 dni i zrezygnowano z kryterium uznania kruszywa za reaktywne w przypadku stwierdzenia „występowania rys, pęknięć lub zmian barwy, wykwitów lub wycieków na powierzchni beleczek” [8]. Pozostało kryterium zmian liniowych. Budzi to następne wątpliwości – czy ten sposób oceny jest miarodajny? Czy powstałe zmiany liniowe świadczą jednoznacznie o reaktywności alkalicznej, czy może pokazują nam inne zjawiska związane z ekspansją w takich warunkach?

Czy badanie powinno przebiegać na konkretnym cemencie i kruszywie stosowanym w danej konstrukcji? Przy coraz powszechniejszym stosowaniu cementów z dodatkami, czy nie istnieje ryzyko, iż potencjalne zmiany liniowe spowodują dodatki do cementu, a nie zjawisko reaktywności alkalicznej?

Kruszywo

Ryzyko szkodliwej reakcji pomiędzy alkaliami i kruszywem powinno być uwzględnione przy wyborze materiałów do wykonywania betonu [3]. Ze względu na aspekty ekologiczne jak i ekonomiczne stosuje się coraz więcej kruszyw, które uważane są za potencjalnie reaktywne: kruszywa żwirowe i dolomitowe. W związku z dużym popytem na rynku kruszyw, w ostatnim okresie wykorzystywane były kruszywa, których charakterystyka oraz wpływ na właściwości betonu w czasie, nie były sprawdzane.

Dodatkowo, złoża, z których pozyskiwane są kruszywa, są niejednorodne, dlatego też bardzo istotne jest zachowanie odpowiedniej częstotliwości badań, w tym również reaktywności alkalicznej.

Cement niskoalkaliczny

Niejednokrotnie podważa się zasadność wymagania w ST zastosowania cementów niskoalkalicznych, przy jednoczesnym założeniu, że w projekcie dopuszcza się stosowanie wyłącznie niereaktywnych kruszyw. Jednocześnie, czy cementy NA nie mogą spowodować ryzyka obniżenia pH, a w konsekwencji przyspieszenia korozji i depasywacji stali?

Tablica 2. Przykładowe, najczęściej spotykane zapisy w specyfikacjach technicznych zabezpieczające przed reaktywnością alkaliczną kruszywa

Przykłady konstrukcji		**Wymagania dotyczące składników betonu**	
		Cement	**Kruszywa**
Obiekty mostowe, betony konstrukcyjne		Cement portlandzki CEM I niskoalkaliczny (NA)	Reaktywność alkaliczna z cementem wg PN-91/B-06714-34 nie powinna wywoływać zwiększenia wymiarów liniowych > 0,1%,
Nawierzchnie betonowe	**lotniskowe**	Czysty klinkierowy cement portlandzki CEM I 42,5 lub cement drogowy klasy nie mniejszej niż 42,5 odpowiadający wymaganiom normy PN-B-19707. Alkaliczność cementu nie powinna przekraczać 0,6% w przeliczeniu na Na_2O. Stosowanie cementów, które przekraczają te granicę, a których przydatność w kompozycji z grysami granitowymi nie została potwierdzona dotychczasowymi pozytywnymi wynikami badań i obserwacji w procesie ekspozycji nawierzchni, powinno być przeprowadzeniem pełnego zakresu badań reaktywności alkalicznej zgodnie z PN-91/B-06714/34.	W przypadku, gdy do betonu przewiduje się stosowanie innych niż granitowe rodzaje kruszyw, powinien być przeprowadzony pełny zakres badań reaktywności alkalicznej cementu.
	drogowe wg norm polskich	Cement specjalny CEM I 42,5N HSR/NA wg normy PN-B-19707 (wymaganie ≤ 0,6%Na_2O_{eq} = Na_2O+0,658 K_2O). Stosowanie cementu niskoalkalicznego NA, jest uzasadnione tylko w przypadkach, gdy dla używanych kruszyw faktycznie stwierdzono potencjalną reaktywność alkaliczną.	Kruszywo łamane powinno odpowiadać 0 stopniowi potencjalnej reaktywności alkalicznej wg normy PN-B-06714-46. W przypadku, gdy kruszywo nie odpowiada 0 stopniowi należy przeprowadzić dodatkowe badania według norm PN-B-06714.34:1991 i PN-B-06714.34/Az1:1997. Na polecenie Inżyniera, należy wykonać badania dodatkowe.
	drogowe wg wytycznych niemieckich	Wymagane zawartości alkaliów w cementach do betonów nawierzchniowych (Zawartość alkaliów w cemencie Na_2O – ekwiwalent [M %]): CEM I oraz CEM II/A-S, -T, -LL ≤ 0,80; CEM II/B-T oraz CEM II/B-S (zawartość dodatku w cementach 21÷29%) ≤ 0,90; CEM II/B-S (zawartość dodatku w cementach 30÷35%) ≤ 1,00;CEM III/A (zawartość dodatku w cementach 36÷50%) ≤ 1,05;	Kruszywo powinno odpowiadać zerowemu stopniowi potencjalnej reaktywności alkalicznej wg normy PN-B-06714-46.
Betony niekonstrukcyjne		Brak wymagań	Brak wymagań

Diagnostyka korozji alkalicznej

Jak to już zostało wspomniane wcześniej za Neville'm [3] nie jest łatwo odróżnić uszkodzenia wywołane reaktywnością alkaliczną od zarysowań spowodowanych atakiem siarczanowym, zamrażaniem i rozmrażaniem lub też znacznym skurczem plastycznym (rys. 4). Można zaryzykować stwierdzenie, że przyczyna ta może być pomijana w przypadku, gdy współdziała więcej czynników korozyjnych. Przykładowo, gdy na obiekcie np. mostowym, który nie jest monitorowany, wystąpią zarysowania wywołane reaktywnością alkaliczną, następnie w wyniku karbonatyzacji lub korozji siarczanowej następuje korozja zbrojenia i na powierzchni betonu można zaobserwować rdzawe nacieki – cała destrukcja jest przypisywana zupełnie innym czynnikom i nikt nie podejrzewa, że całe zjawisko zostało zainicjowane przez reakcje alkaliczne kruszywa.

Rys. 4. Przykłady destrukcji wywołanej reaktywnością alkaliczną [20]

6. Podsumowanie

Celem artykułu było uwypuklenie problematyki reakcji alkalicznej kruszywa oraz zasygnalizowanie możliwych trudności związanych z zapobieganiem tego typu korozji, która może być inicjującym etapem destrukcji konstrukcji z betonu. W dobie coraz szerszego projektowania betonu z uwzględnieniem efektów synergistycznych, należy przewidywać możliwe skutki takich modyfikacji i uwzględnić je poprzez odpowiednie zapisy w specyfikacji. Problem reaktywności alkalicznej kruszyw jest aktualny również w warunkach polskich.

Literatura

1. Czarnecki L., Emmons P.H.: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, 2002.
2. Kurdowski W.: Chemia cementu i betonu, Polski Cement, 2010.
3. Neville A.M.: Właściwości betonu, Polski Cement, 2012.
4. Pyy H., Holt E., Ferreira M.: An Initial Survey on the Occurrence of Alkali Aggregate Reaction in Finland, Customer Report VTT-CR-00554-12, 2012.

5. ACI 221.1R-98 State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity Reported by ACI Committee 221.
6. Góralczyk S.: Reaktywność alkaliczna kruszyw. Nowa europejska metodyka badań i oceny, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały Nr 39, 2011.
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 – Oznaczanie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką.
10. PN-B-06714-47:1988 Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie potencjalnej reaktywności alkalicznej – Oznaczanie zawartości krzemionki rozpuszczalnej w wodorotlenku sodowym (NaOH).
11. Niemieckie Dyrektywy DafStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“
12. 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
13. Jackiewicz-Rek W., Konopska M.: Rola specyfikacji betonu w zapewnieniu bezpieczeństwa obiektów mostowych, XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, 2011;
14. Owsiak Z.: Alkali–aggregate reaction in concrete containing high-alkali cement and granite aggregate, Cement and Concrete Research 34, 2004.
15. Kwon Y.: A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect, Cement and Concrete Research 35, 2005.
16. Shehata M. H., Thomas M.D.A.: The role of alkali content of Portland cement on the expansion of concrete prisms containing reactive aggregates and supplementary cementing materials, Cement and Concrete Research 40, 2010.
17. Grimal E., Sellier A., Multon S., Le Pape Y., Bourdarot E.: Concrete modelling for expertise of structures affected by alkali aggregate reaction, Cement and Concrete Research 40, 2010.
18. Chatterji S.: Chemistry of alkali–silica reaction and testing of aggregates, Cement & Concrete Composites 27, 2005.
19. Góralczyk S., Łukowska M.: Reaktywność alkaliczna kruszyw węglanowych – identyfikacja i środki zapobiegawcze, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały Nr 41, 2012.
20. Alkali-Aggregate Reaction (AAR) of Concrete Structures, online 12. 2012.
21. Titze A.: Szkody wywołane przez alkalia w betonie. Ryzyko, którego można uniknąć, Infrastruktura Transportu, 2, 2011.
22. Danowski M.: Spękania w nawierzchniach z betonu cementowego spowodowane reakcjami alkaliów z kwasem krzemowym, Polskie Drogi, 12. 2012.