

# Reaktywność alkaliczna kruszyw

Reaktywnością alkaliczną kruszyw określa się podatność kruszyw na reagowanie z alkalią zawartymi w betonie, w wyniku czego następuje obniżenie trwałości betonu, a w konsekwencji – jego destrukcja.

Powodem, dla którego temat reaktywności alkalicznej kruszyw stał się istotniejszy, są spektakularne uszkodzenia betonów nawierzchniowych w środkowych Niemczech, m.in. autostrad A9 i A14 w Saksonii-Anhalt. W ostatniej dekadzie XX w., próbując w krótkim czasie uzupełnić brakującą sieć dróg, administracja drogowa w Niemczech dopuściła do stosowania do betonów nawierzchniowych lokalne kruszywa, nie weryfikując ich pod względem reaktywności alkalicznej. Doprowadziło to do powstania w ostatnich latach licznych uszkodzeń nawierzchni betonowych, podważając niesłusznie trwałość rozwiązań betonowych konstrukcji drogowych, co jest istotne zwłaszcza w Polsce, w obliczu deklaracji wybudowania w ramach Programu Budowy Dróg Krajowych na lata 2014-2020(23) ok. 850 km dróg właśnie o nawierzchni z betonu cementowego. Należy zauważyć, że świadomość zagadnień związanych z reaktywnością alkaliczną kruszyw nie jest nowością, świadczą o tym opracowania dotyczące

tego zagadnienia z lat czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku. Warto podkreślić, że już w 1978 roku opublikowano w Polsce pierwszą normę kompleksowo opisującą metodykę oznaczania reaktywności alkalicznej kruszyw.

## Reaktywność alkaliczna

Alkalia w betonie pochodzą głównie z cementu. Niewątpliwie zmiana, jaka nastąpiła pod koniec XX w. w technologii produkcji cementu, tj. zastąpienie stosowanej wcześniej metody mokrej produkcji klinkieru portlandzkiego, głównego składnika cementu, metodą suchą, doprowadziła do niewielkiego wzrostu zawartości w cementach związków metali alkalicznych. Jednak związki metali alkalicznych mogą zostać wprowadzone do betonu również z dodatkami mineralnymi, powszechnie stosowanymi domieszkami chemicznymi, a także z samym kruszywem.

Wyróżniamy trzy główne rodzaje reakcji alkalia – kruszywo:

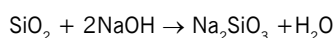
- reakcja alkalia – krzemionka (ASR)
- reakcja alkalia – krzemiany
- reakcja alkalia – węglany (ACR).

W kruszywie krzemionka występuje w różnych formach, zależnie od warunków powstawania. Najczęstszymi formami występowania krzemionki są: kwarc – będący formą krystaliczną, trydymit – będący niestabilną formą krystaliczną, chalcedon

Tab. 1. Skład chemiczny analizowanych kruszyw

	Kujawy wapień	Radko- wice dolomit	Dubie dolomit	Gryżyce żwir	Sępólno żwir	Glińsko żwir	Dębina żwir	Ostro- wite żwir	Chelm żwir	Sulików bazalt	Lubień bazalt	Klesov grano- driort
CaO	57,51	41,24	35,12	2,43	22,58	29,75	10,09	24,71	23,59	14,21	13,27	2,12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,03	2,00	1,61	1,98	3,05	3,15	3,69	2,85	4,69	10,65	9,07	4,77
K <sub>2</sub> O	0,46	0,87	0,56	2,83	2,11	2,34	1,61	1,70	2,30	1,10	1,37	5,54
SiO <sub>2</sub>	7,93	7,96	11,44	66,44	35,75	28,71	46,37	33,85	31,46	32,80	39,79	56,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,97	3,10	3,58	8,54	6,65	6,26	8,73	7,14	7,76	13,36	13,63	14,81
MgO	1,32	12,49	14,47	0,60	1,36	1,13	1,99	1,43	1,27	6,94	5,57	1,44
CO <sub>2</sub>	28,04	31,60	32,43	15,78	27,10	26,71	25,44	26,33	27,52	13,71	12,70	11,40
TiO <sub>2</sub>	0,17	0,06	0,23	0,05	0,30	0,25	0,46	0,40	0,39	2,02	1,62	0,81
MnO	0,08	0,28	0,03	0,02	0,07	0,06	0,05	0,08	0,13	0,29	0,09	0,06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,09	0,72	0,01	0,16	0,08	1,32	0,65	0,06
SO <sub>3</sub>	0,24	0,22	0,07	0,04	0,02	0,14	0,16	0,00	0,00	0,00	0,01	0,08
Na <sub>2</sub> O	0,26	0,18	0,43	1,27	0,93	0,77	1,41	1,37	0,81	3,59	2,23	2,56

– będący formą krystaliczną, a także opal – będący formą bezpostaciową. Najbardziej podatne na reakcje z alkaliami są formy bezpostaciowe i krystaliczne. Kwarc ze swoją wyraźną strukturą krystaliczną nie jest wrażliwy na działanie alkaliów. Reakcja alkalia – krzemionka zaczyna się od agresywnego działania alkalicznych wodorotlenków na minerały krzemionkowe [2]. Produktem reakcji jest żel uwodnionego krzemianu alkaliów, który charakteryzuje się wysoką zdolnością wchłaniania wody, co prowadzi do znacznego wzrostu jego objętości. Powstały żel, pochłaniając wodę i pęczniąc, wywiera ciśnienie na ograniczający go czynnik cementowy, co prowadzi do pęcznienia, pęknięcia i rozpadu zaczynu [3]. Przyczyną pęcznienia zaczynu może być ciśnienie hydrauliczne wywołane przez osmozę, jak i ciśnienie wywołane zwiększeniem objętości produktów reakcji alkalia – krzemionka [2]:



Aby doszło do reakcji alkalia – krzemionka, muszą wystąpić sprzyjające jej warunki środowiskowe. Koniecznym czynnikiem umożliwiającym reakcję jest wilgotność wewnątrz betonu. Za minimalną wartość wilgotności względnej wewnątrz betonu umożliwiającą wystąpienie reakcji uznaje się 85% przy temperaturze 20°C; wyższa temperatura pozwala na uaktywnienie się reakcji przy niższej wilgotności [2].

W ekstremalnych warunkach skutki reakcji ASR w betonie można zauważyć już w pierwszych kilku miesiącach. Jednak w praktyce procesy destrukcji konstrukcji betonowej w wyniku reakcji ASR są bardzo powolne i zazwyczaj pojawiają się po kilku, kilkunastu latach, co potwierdzają przywołane wcześniej doświadczenia niemieckie [5].

### Metodologia badań reaktywności kruszyw

Obecnie metody badania reaktywności alkalicznej kruszyw możemy podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- metody chemiczne („szybkie”) – do oznaczania potencjalnej reaktywności, oparte na reakcjach chemicznych zachodzących pomiędzy kruszywem a roztworem alkalicznym;
- metody fizyczne („beleczkowe”) – do oznaczania reaktywności, oparte na pomiarze wydłużenia/ekspansji próbek betonowych.

W Polsce badanie potencjalnej reaktywności alkalicznej kruszyw opisuje norma PN-B 06714-46 *Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej*. Wydanie tej normy z roku 1992 pozostaje w zbiorze polskich norm ze statusem normy aktualnej. Metoda oznaczenia potencjalnej reaktywności wg PN-B 06714-46 polega na poddaniu próbki kruszywa działaniu roztworu wodorotlenku sodu i określeniu ubytku masy kruszywa. Zależnie od poziomu ubytku masy, kruszywo kwalifikuje się do jednej z trzech kategorii:

- niereaktywne – ubytek masy  $\leq 0,5\%$  (stopień 0)
- potencjalnie reaktywne – ubytek masy  $> 0,5\%$  i  $\leq 2,0\%$  (stopień 1)
- kruszywo reaktywne – ubytek masy  $> 2,0\%$  (stopień 2).

Tab. 2. Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej wg PN-B 06714-46 (frakcja 4/8)

	Kujawy wapień	Radkowice dolomit	Dubie dolomit	Gryżce żwir	Sępólno żwir	Glińno żwir	Dębina żwir	Ostrowite żwir	Chelm żwir	Sulików bazalt	Lubień bazalt	Klesov granodioryt
Ubytek masy wg PN-B 06714-46, [%]	0,0	0,0	0,0	0,3	1,2	0,4	0,1	0,6	0,6	0,0	0,0	0,0
Stopień reaktywności	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
Ocena reaktywności	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	potencjalnie reaktywne	niereaktywne	niereaktywne	potencjalnie reaktywne	potencjalnie reaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne

Tab. 3. Oznaczenie reaktywności alkalicznej wg PN-B 06714-34 (frakcja 4/8)

	Kujawy wapień	Radkowice dolomit	Dubie dolomit	Gryżce żwir	Sępólno żwir	Glińno żwir	Dębina żwir	Ostrowite żwir	Chelm żwir	Sulików bazalt	Lubień bazalt	Klesov granodioryt
Pęcznienie wg PN-B 06714-34, [%]	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,03	0,03	0,06	0,05	0,01	0,01	0,02
Ocena reaktywności	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne

Na świecie do szybkiej oceny potencjalnej reaktywności alkalicznej stosuje się metodę opisaną przez Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów w dokumencie ASTM C289 *Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (Chemical method)*. Metoda ta polega na poddaniu próbki kruszywa działaniu roztworu wodorotlenku sodu, a następnie oznaczeniu zmiany alkaliczności odfiltrowanego roztworu oraz ilości rozpuszczonej w nim krzemionki.

Metody chemiczne zazwyczaj są stosowane do wstępnej oceny reaktywności i zaleca się ich stosowanie w połączeniu z metodami beleczkowymi. Metody beleczkowe polegają na wykonaniu próbek betonowych z udziałem badanego kruszywa i pomiarze ich zmian liniowych po przechowywaniu w określonych warunkach przez ustalony okres, które symulują warunki środowiskowe sprzyjające występowaniu reakcji alkalia – kruszywo. Polska metoda badań reaktywności alkalicznej kruszyw opisana jest w normie *PN-B 06714-34 Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczenie reaktywności alkalicznej*. Ostatnie

Tab. 2. Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej wg PN-B 06714-46 (frakcja 4/8)

	Kujawy wapień	Radkowiec dolomit	Dubie dolomit	Gryźce żwir	Sępólno żwir	Gliśno żwir	Dębina żwir	Ostrowite żwir	Chełm żwir	Sulików bazalt	Lubień bazalt	Klesov granodioryt
Obniżenie alkaliczności wg ASTM C289, [mmol/dm <sup>3</sup> ]	150	580	585	510	125	250	310	170	350	515	500	285
Krzemionka rozpuszczalna w NaOH wg ASTM C289 [mmol/dm <sup>3</sup> ]	110	530	222	160	140	286	219	195	90	134	80	220
Ocena reaktywności	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	potencjalnie reaktywne	niereaktywne	niereaktywne	potencjalnie reaktywne	potencjalnie reaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne

Tab. 5. Oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej wg ASTM C1260 (frakcja 4/8)

	Kujawy wapień	Radkowiec dolomit	Dubie dolomit	Gryźce żwir	Sępólno żwir	Gliśno żwir	Dębina żwir	Ostrowite żwir	Chełm żwir	Sulików bazalt	Lubień bazalt	Klesov granodioryt
Pęcznienie wg ASTM C1260, [%]	0,04	0,03	0,01	0,05	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04	0,02	0,01	0,02
Ocena reaktywności	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne	niereaktywne

wydanie normy nastąpiło w 1991 roku, a ostatnia zmiana została wprowadzona w 1997 roku. W 2012 roku norma została wycofana przez Polski Komitet Normalizacyjny i na razie nie została zastąpiona innym dokumentem. Metoda opisana w normie polega na pomiarze zmian liniowych, a także wizualnej ocenie zmian destrukcyjnych próbki betonowej przechowywanej przez 180 dni w wilgotnych warunkach, w temperaturze 36-40°C. Ekstremalne warunki działania alkaliów na kruszywo są zapewnione poprzez precyzyjne określenie składu ziarnowego badanego kruszywa oraz zastosowanie do wykonania próbek cementu o zawartości alkaliów  $1,2 \pm 0,1\%$ . Za niereaktywne uznaje się kruszywa, dla których ekspansja beleczek jest mniejsza od 0,1%.

Bardzo podobne do polskiej metody jest badanie opisane przez ASTM w dokumencie ASTM C1260 *Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-bar method)*. Najistotniejszą różnicą w porównaniu z oznaczeniem wg

PN-B 06714-34 jest okres przechowywania próbek, który w metodzie amerykańskiej ograniczony jest do 14 dni. W zamian za skrócenie czasu przechowywania próbek wg ASTM przewiduje się znaczne przyspieszenie zachodzenia reakcji z alkaliami poprzez przechowywanie próbek w roztworze wodorotlenku sodu, w temperaturze 80°C.

#### Ocena reaktywności alkalicznej kruszyw

Firma LafargeHolcim zleciła przeprowadzenie kompleksowych badań wybranych kruszyw. Badanie wykonał Instytut Badawczy Materiałów Budowlanych.

Badanie zostało podzielone na trzy etapy. W pierwszym z nich dokonano opisu petrograficznego i przeprowadzono badania składu chemicznego kruszyw. W analizie chemicznej zwrócono szczególną uwagę na zawartość w składzie kruszyw związków metali alkalicznych. Kolejnym etapem było wykonanie oznaczenia potencjalnej reaktywności alkalicznej oraz reaktywności alkalicznej kruszyw metodami opisanymi w polskich normach. Ostatnim etapem było oznaczenie potencjalnej reaktywności alkalicznej kruszyw metodami opisanymi przez normy ASTM. Wyniki analizy chemicznej oraz oznaczenia reaktywności alkalicznej metodami polskimi oraz wg ASTM przedstawiono w tab. 1-5.

#### Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć pewne wnioski na temat reaktywności alkalicznej przebadanych kruszyw.

Pierwszym spostrzeżeniem jest fakt, że alkalia wprowadzone do betonu w samych kruszowach nie mają istotnego wpływu na ocenę ich reaktywności alkalicznej. Betony z kruszywami o większej zawartości związków alkalicznych wykazywały niższy poziom ekspansji niż kruszywa o mniejszej zawartości alkaliów. Kolejny wniosek dotyczy efektywności metod oceny potencjalnej reaktywności (metody szybkie) zgodnie z wymaganiami polskimi i amerykańskimi. Jak pokazują wyniki przeprowadzonych badań, metody szybkie nie dają jednoznacznej odpowiedzi, czy analizowane kruszywo jest reaktywne. Metody chemiczne, szczególnie metoda wg ASTM, mają tendencję do kwalifikowania jako reaktywne kruszyw, które w badaniach na próbkach betonowych nie wykazują żadnych oznak destrukcji. Można zakładać, że metody te nie powinny samodzielnie stanowić o wykluczeniu kruszyw z zastosowań w betonie. Jednak z uwagi na poważne zagrożenie, jakie niesie ze sobą destrukcja betonu wywołana reakcjami ASR i ACR, kruszywo stosowane do betonów cementowych powinno być zweryfikowane pod względem reaktywności.

Jak wykazały przeprowadzone badania, przebadane kruszywa nie wykazują tendencji do ulegania destrukcyjnej reakcji alkalia – kruszywo. Badania potwierdziły, że stosowanie tych kruszyw w betonach jest bezpieczne, biorąc pod uwagę zagrożenie wystąpienia reakcji alkalia – kruszywo.

**Jarosław Rokita**  
**Maciej Sypek**  
**LafargeHolcim**