

Danuta Kukielska, Stefan Góralczyk

Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego w Warszawie

Identyfikacja reakcji kruszywo – alkalia

Kruszywo zawierające minerały lub skały reagujące z alkaliowymi w cemencie określa się jako kruszywo potencjalnie reaktywne. Ze względu na sposób produkcji cementu reaktywność alkaliczna stanowi problem coraz częściej spotykany. Wczesne, prawidłowe wykrycie zjawiska jest bardzo istotne ze względów bezpieczeństwa obiektów betonowych.

Rodzaje i mechanizm reakcji alkalia – kruszywo

Zjawisko reaktywności alkalicznej kruszyw jest zjawiskiem złożonym, dlatego dobór metod badawczych pozwalających stwierdzić, czy kruszywo jest reaktywne, nie jest proste i wymaga

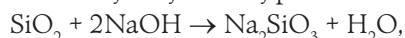
przeprowadzenia długotrwałych, kilkietapowych badań. Według nomenklatury przyjętej w badaniach RILEM wyróżniono trzy rodzaje reakcji alkalicznych, między bezpostaciową krzemionką, krzemianami lub węglanami – wymienione substraty to często główny lub znaczący składnik kruszywa.

Rodzaje reakcji alkalicznych wg RILEM:

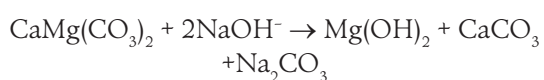
- S – kruszywo, w którym mogą zachodzić reakcje krzemionka – alkalia (ASR – *alkali-silica reactive*),
- C – kruszywo, w którym mogą zachodzić reakcje krzemionka – węglany (ACR – *alkali-carbonate reactive*),
- SC – kruszywo, w którym mogą zachodzić zarówno reakcje alkalia – krzemionka, jak i alkalia – węglany.

Przebieg reakcji można przedstawić następująco:

- pomiędzy krzemionką bezpostaciową i alkaliowymi
 - reakcja najbardziej powszechna:

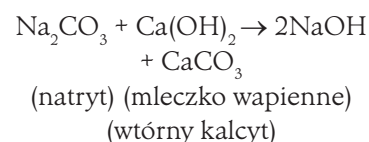


- pomiędzy alkaliowymi i węglanami rozpad dolomitu „dedolomityzacja”:



(dolomit) (brucyt) (kalcyt) (natryt)

Reaktywność alkaliczna kruszyw definiowana jest jako skłonność niektórych składników kruszyw do reagowania z alkaliowymi pochodzącymi z cementu. W wyniku tych reakcji może wystąpić w betonie szkodliwa ekspansja prowadząca do jego destrukcji. Reakcja alkalia – kruszywo wg dokumentów AAR jest to chemiczno-fizyczna ekspansywna reakcja w zaprawie lub betonie zachodząca pomiędzy reaktywną fazą mineralną kruszyw i alkaliowymi znajdującymi się w roztworze porowym, pochodzącymi z zaczynu cementowego lub innych zewnętrznych źródeł.



Reakcje w betonie pomiędzy kruszywem a zaczynem cementowym i znajdującymi się tam alkaliowymi zachodzą przy każdym rodzaju kruszywa, a ich przebieg i stopień nasilenia zależą od wielu czynników, z których najważniejszymi są rodzaj stosowanego kruszywa i ilość zawartych w nim składników potencjalnie reaktywnych (skład mineralogiczny oraz struktura i tekstura skały). Istotne znaczenie mają także warunki hydrotermiczne (wilgotność, temperatura) od-

działające na beton oraz ilości alkaliów w betonie (powyżej 0,6%).

Objawy reaktywności

Szkodliwe reakcje alkaliczne w kruszywach przebiegają powoli i stopniowo. Zazwyczaj w umiarkowanym i chłodniejszym klimacie zaczynają powodować widoczne uszkodzenia po pięciu, dziesięciu latach i mogą następować przez kolejne 20 lub 30 lat, a nawet dłużej. W cieplejszym klimacie reakcje są często przyspieszone. W niektórych kruszywach reakcje następują wolno, ale w końcowym stadium powodują większą destrukcję. W przypadku reakcji z udziałem potencjalnie reaktywnych kruszyw węglanowych, nawet w betonie zawierającym niewielką zawartość alkaliów pochodzących z cementu, zjawiska ekspansji i uszkodzenia struktur mogą być widoczne już po trzech latach.

W wyniku reakcji alkalia – kruszywo wokół ziarna następują zmiany składu fazowego, powstają otoczki żeluz, które mogą pęcznieć pod wpływem wilgoci, wywołując naprężenia, a to może spowodować zarysowania, spękania. Towarzyszyć temu może pojawienie się wykwitów, plam, nacieków. W dalszej kolejności może dojść do powstania mikroszczelin,



Rys. 1. Obraz ziarn z objawami reaktywności alkalicznej [1]: a) obrzeże reakcji w gnejsie, b) kieszeń żelowa w pustych przestrzeniach w mułowcu reaktywnym, c) żel ASR na powierzchni pęknięć reaktywnego rogowca

odprysków, odspojenia ziarn kruszywa – efektem jest obniżenie trwałości betonu (rys. 1).

Na rys. 2-3 zamieszczono przykłady obiektów, w których obserwować można zmiany wywołane reakcjami alkalicznymi. W Polsce również można zaobserwować obiekty budowlane, w których widoczne są skutki reaktywności kruszyw (rys. 4-5).

Potencjalnie reaktywne kruszywa

Kruszywa reaktywne wg dokumentów AAR są to kruszywa, w których występują reakcje z alkalią zazwyczaj pochodzącymi z zaczynu cementowego i znajdującymi się w roztworze porowym w betonie, tworzące się jako ekspansywna reakcja wewnątrz ziarn kruszywa. W ekstremalnych przypadkach reakcje te mogą wywołać poważne pęknięcia w betonie. Ogólnie kruszywa reaktywne mogą być podzielone na wysoko reaktywne, słabo reaktywne lub spowolnione, a także reaktywne kruszywa węglanowe.

Do niedawna z reakcjami alkalicznymi utożsamiano niewielką grupę litologiczną skał. Najnowsze badania wykazały, że znacznie więcej, niż sądzono, rodzajów litologicznych skał może być potencjalnie podatnych na alkalia, tzn. mogą być reaktywne. Zniszczenie konstrukcji betonowych spowodowane reakcją alkaliów z kruszywem zanotowano w ponad 50 krajach, w różnych obszarach geograficznych.

W zależności od rodzaju i zawartości składników reaktywnych w kruszywach, można je podzielić na trzy klasy:

- klasa I: kruszywo zawierające niewykrywalny opal lub podobną wysoko reaktywną krzemionkę i zawierające 95% lub więcej składników określanych jako „nieszkodliwe”,
- klasa II: kruszywo, które nie ma odpowiedników w klasie I lub II,

- klasa III: kruszywo zawierające 1% lub więcej opalu lub podobną wysoko reaktywną krzemionkę lub krytyczną lub „ujemną” proporcję składników określanych jako potencjalnie reaktywne.

W ramach kruszyw klas II i III wydzielono podklasy na podstawie udziału w skałach reaktywnego materiału pochodzenia krzemionkowego lub węglanowego:

- klasa II-S i III-S: kruszywo zawierające szczególnie składniki mogące wywoływać potencjalnie reakcje alkalia – krzemionka (ASR),
- klasa II-C i III-C: kruszywo zawierające szczególne składniki mogące wywoływać potencjalnie reakcje alkalia – węglany (ACR),
- klasa II-S.C i III-S.C: kruszywo zawierające szczególne składniki mogące wywoływać jednocześnie występowanie potencjalnych reakcji alkalia – krzemionka (ASR) i alkalia – węglany.

Występowanie ASR jest zdecydowanie szersze od ACR. W efekcie badań wykonanych w ramach RILEM [4] stwierdzono, że podstawowe surowce mineralne podatne na alkalia to minerały i skały (ich wykaz podaje tab. 1).

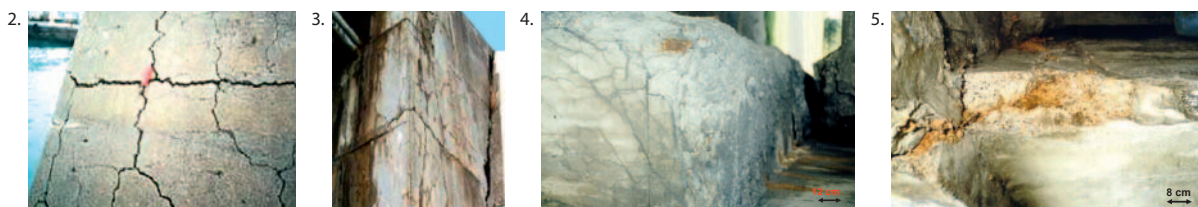
Badania identyfikujące potencjalną reaktywność alkaliczną

System oceny reaktywności alkalicznej w UE

Do rozwiązania problemu oceny reaktywności alkalicznej kruszyw w UE powołano Komitet Techniczny RILEM TC ARP. Skupiał on najwybitniejszych ekspertów tego zagadnienia z Europy i ze świata. W Komitecie Polska była reprezentowana przez Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego. Gremium to czynnie współpracowało z Komitetem Normalizacyjnym CEN/TC 154 Kruszywa. Podstawowym zadaniem RILEM TC ARP było opracowanie jednolitych metod badań reaktywności alkalicznej kruszyw, oddzielnie dla reakcji:

MINERAŁY	SKAŁY
Opal, chalcedon, trydymit, krystalalit, oliwiny, pirokseny, amfibole, chloryty, minerały ilaste, zeolity, minerały siarczanowe i siarczkowe, tlenki żelaza	Skały krzemionkowe (krzemienie, rogowce, diatomity) piaszczyste o spoiwie ilastym i krzemionkowym, skały wulkaniczne (melafiry, porfiry, bazalty oliwinowe), szkliwo wulkaniczne (obsydian), tufy wulkaniczne, skały węglanowe przede wszystkim dolomitowe i ilaste, zwietrzałe skały granitowe

Tab. 1. Podstawowe surowce mineralne podatne na alkalia (wg badań w ramach RILEM) [4]



Rys. 2. Fragment ściany. Spękania powierzchni konstrukcji betonowych spowodowanych reakcjami alkalicznymi, niektóre szczeliny wypełnione są żelem [2]

Rys. 3. Ściana oporowa. Pęknięcie i uszkodzenia powierzchni betonu na elementach betonowych konstrukcji wystawione przez dłuższy czas na działania wilgoci, niektóre pęknięcia wypełnione są żelem [2]

Rys. 4. Wiadukt k. Kielc. Destrukcja elementów betonowych wywołana reaktywnością alkaliczną. Odpryskiwanie i łuszczenie się betonu. Widoczne wycieki żelowe oraz rdzawe nacieki pochodzące od korodującego odkrytego zbrojenia [3]

Rys. 5. Wiadukt k. Kielc. Destrukcja elementów betonowych wywołana reaktywnością alkaliczną. Odpryskiwanie i łuszczenie się betonu. Widoczne wycieki żelowe oraz rdzawe nacieki pochodzące od korodującego odkrytego zbrojenia [3]

alkalia – krzemionka bezpostaciowa (ASR) i alkalia – węglany, dedolomityzacji (ACR). Metody zostały sprawdzone w kilkunastu laboratoriach w różnych krajach europejskich.

Prace podjęto w 2000 roku w ramach projektu badawczego PARTNER [5] „European Standard Tests to Prevent Alkali Reactions in Aggregates” (Europejskie normowe badania zapobiegania reakcjom alkalicznym w kruszywach „PARTNER” [6]) i równolegle w komitecie technicznym ARP (Alkali Reactivity and Prevention, Assessment, Specification and Diagnosis) Międzynarodowego Komitetu RILEM TC 191 (Reakcje alkaliczne, zapobieganie, ocena, wymagania i diagnozowanie), a następnie w nowej strukturze tego komitetu RILEM TC 219

ACS Alkali-Aggregate Reactions in Concrete Structures (Reakcje alkalia – kruszywa w strukturach betonu) [6-11].

W wyniku przeprowadzonych badań komitet RILEM rekomenduje następujące metody badania reaktywności alkalicznej:

- Opis petrograficzny – AAR-1 Detection of potential alkali-reactivity – Petrographic Examination Method.
- Przyspieszona metoda beleczek z zaprawy – AAR-2 – Detection of potential alkali-reactivity – Accelerated mortar-bar test method for aggregates.
- Szybka metoda beleczkowa dla kruszyw węglanowych – AAR-5 – Rapid Preliminary Test for Carbonate Aggregates.

RODZAJ KRUSZYWA	WYNIKI BADANIA WG PN-B-06714-34:1991 KRUSZYWA MINERALNE. BADANIA. OZNACZANIE REAKTYWNOŚCI ALKALICZNEJ		WYNIKI BADANIA WG AAR	
	Przyrost w %	KRYTERIUM: kruszywo reaktywne, gdy zmiany liniowe > 0,1%	Ekspansja, w %	KRYTERIUM: < 0,1% kruszywo niereaktywne > 0,2% kruszywo bardzo reaktywne
Kruszywo bazaltowe	0,000	niereaktywne	0,07	niereaktywne
	-0,003	niereaktywne	0,06	niereaktywne
	-0,002	niereaktywne	0,06	niereaktywne
	-0,002	niereaktywne	0,05	niereaktywne
Kruszywo naturalne zwirowe	0,016	niereaktywne	0,62	bardzo reaktywne
	0,019	niereaktywne	0,64	bardzo reaktywne
	0,000	niereaktywne	0,64	bardzo reaktywne
	0,033	bardzo reaktywne	0,64	bardzo reaktywne
	-0,010	niereaktywne	0,07	niereaktywne
	-0,019	niereaktywne	0,03	niereaktywne
	-0,018	niereaktywne	0,04	niereaktywne
-0,019	niereaktywne	0,11	reaktywne	

Tab. 2. Wskaźnikowe badania porównawcze metod, które zawierają normy PN z metodami rekomendowanymi przez RILEM. Źródło: opracowanie własne

- Metoda beleczkowa w temp. 38°C dla kruszyw mieszanych – AAR-3 Detection of potential alkali-reactivity – 38°C test method for aggregate combinations using concrete prism.
- Metoda beleczkowa w temp. 60°C dla kruszyw mieszanych – AAR-4.1 – Detection of potential alkali-reactivity – 60°C test method aggregate combinations using concrete prisms.

Reaktywność alkaliczna kruszyw jest zjawiskiem złożonym, tak pod względem mogących występować typów reakcji alkalicznych, jak i różnorodności czynników mineralogicznych, chemicznych i atmosferycznych wpływających na ich wystąpienie i przebieg. Ocena reaktywności kruszywa jest przedsięwzięciem trudnym, wymagającym przeprowadzenia długotrwałych, wielostopniowych badań. Na rys. 6 przedstawiono schemat badań zalecany w dokumentach AAR.

Zasady badania reaktywności alkalicznej w Polsce

Zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) Nr 305/2011 z 2011 r. oraz Ustawą o wyrobach budowlanych z 2013 r. wyrób wprowadzany na rynek musi być bezpieczny, o czym zaświadcza oznakowanie go znakiem CE. W przypadku wyrobów objętych normami zharmonizowanymi wyrób należy przebadać wg zakresu zawartego w odpowiedniej do danego zastosowania normie. W przypadku kruszyw do betonów, do których odnosi się norma PN-EN 12620, zakres badań obejmuje podatność na reaktywność alkaliczną, jedną z ważniejszych właściwości kruszyw związanych z bezpieczeństwem.

Zgodnie z zasadami UE w przypadku braku norm europejskich określających badanie istotnych właściwości kruszywa obowiązują zasady funkcjonujące w kraju stosowania kruszywa. Jak do tej pory Komitet TC 154 nie opracował norm europejskich na badanie reaktywności alkalicznej. W takiej sytuacji powinny obowiązywać normy polskie.

Tymczasem norma PN-86/B-06712 *Kruszywa mineralne do betonu*, która zawierała wymagania w tym zakresie, określała graniczne wartości dla poszczególnych stopni reaktywności alkalicznej, została w całości wycofana jako norma sprzeczna z wdrożoną normą EN 12620 *Kruszywo do betonu*. Ostateczny termin wycofania normy PN-86/B-06712 minął w czerwcu 2004 r.

W normie PN-86/B-06712 była także określona metodyka badania reaktywności alkalicznej. W Polsce obowiązywały dwie normy dotyczące badania tej właściwości, tj. PN-91/B-06714-34 *Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie reaktywności alkalicznej* i PN-92/B-06714-46 *Kruszywa mineralne. Badania.*

Oznaczanie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką.

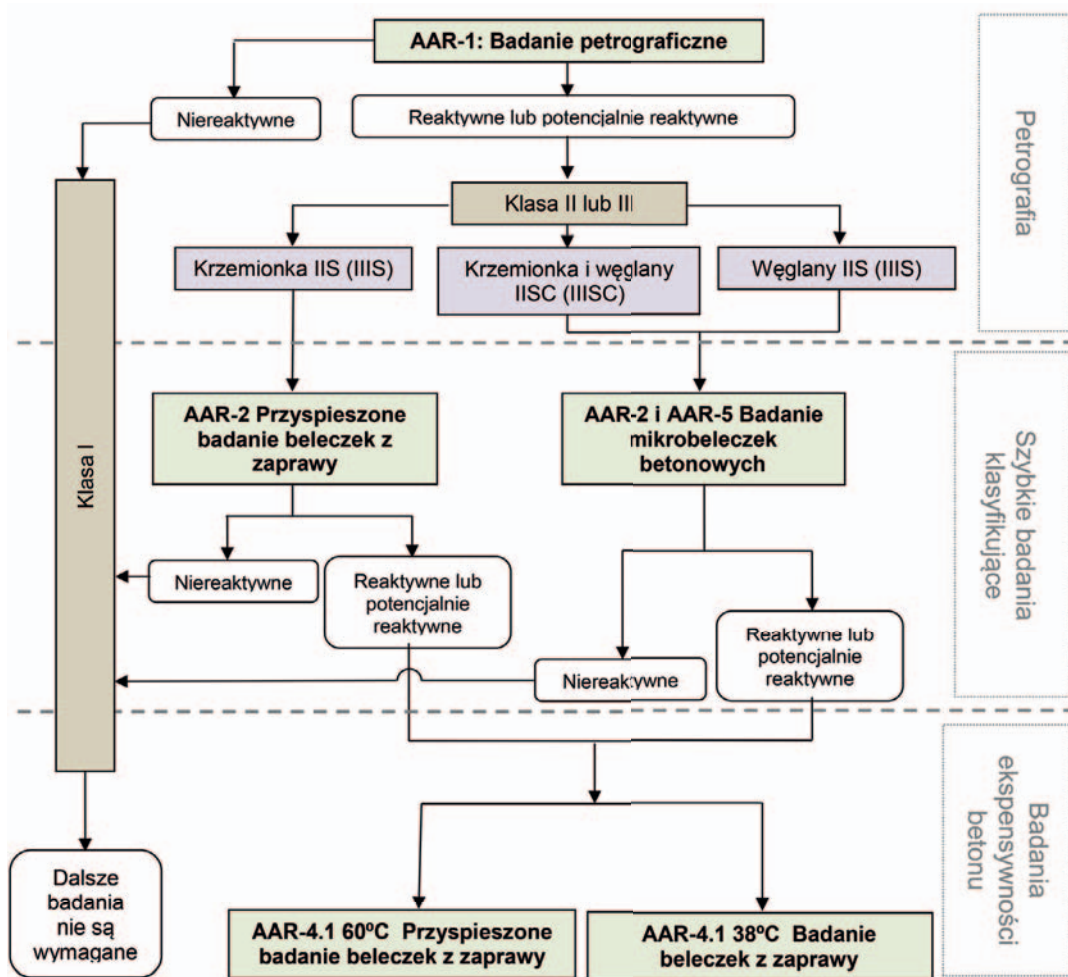
W wyniku corocznego przeglądu norm przeprowadzanego przez PKN, którego celem jest wycofanie norm, które nie są stosowane bądź zawierają przestarzałe metody badawcze, obie normy zostały wycofane w 2012 r. Wobec czego, mimo że norma zharmonizowana nakazuje badanie reaktywności alkalicznej, w Polsce doszło do sytuacji, w której nie było żadnej normy opisującej metodykę badania oraz oceny tej właściwości. Żeby nie dopuścić do takiej sytuacji, Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego zgłosił w PKN gotowość nowelizacji normy PN-92/B-06714-46, dzięki temu do czasu zakończenia prac nad nowelizacją norma nie została wycofana ze zbioru Polskich Norm. Aktualny stan możliwości identyfikacji reaktywności alkalicznej w Polsce jest więc taki, że funkcjonuje jedna norma PN-92/B-06714-46 *Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie potencjalnej reaktywności alkalicznej metodą szybką*. Nadal jednak nie ma kryteriów oceny tej właściwości.

Różnice w ocenie reaktywności kruszyw wg metod krajowych i wg RILEM

Stosowana obecnie w Polsce metoda badawcza jest mało skuteczna w identyfikacji zjawiska. Dotyczy to zwłaszcza reakcji alkalia – węglany (ACR). W IMBiGS przeprowadzono wskaźnikowe badania porównawcze metod, które zawierają normy PN z metodami rekomendowanymi przez RILEM. Wyniki badań wskazują, że ocena reaktywności kruszyw przeprowadzona wg różnych metod może być zasadniczo odmienna (tab. 2).

Podsumowanie

Zjawisko występowania reakcji alkalicznych w kruszywach, pomimo wieloletnich badań, jest jeszcze nie do końca wyjaśnione, szczególnie jego występowanie w kruszywach węglanowych. Reaktywność alkaliczna kruszyw jest zjawiskiem złożonym, tak pod względem typów reakcji alkalicznych, jak i różnorodności czynników mineralogicznych, chemicznych i atmosferycznych wpływających na ich wystąpienie i przebieg. W przypadku kruszyw węglanowych wpływ czynników środowiskowych na reakcje alkaliczne z ich udziałem nie jest tak dominujący jak w przypadku reakcji alkalia – krzemionka, jednakże jest on konieczny, aby wystąpiły reakcje alkaliczne. Zjawisko występuje praktycznie we wszystkich strefach klimatycznych, tam, gdzie parametry wilgotności i temperatury zmieniają się w pewnym interwale. Uzależnienie przebiegu reakcji alkalicznych w kruszywie od warunków środowiskowych, czyli od strefy klimatycznej zastosowania kruszywa,



Rys. 6. Zintegrowany system badań reaktywności alkalicznej kruszyw S, S.C wg dokumentu AAR-1. Źródło: opracowanie własne

jest dodatkowym utrudnieniem w opracowaniu zunifikowanego systemu badania zjawiska w różnych krajach, ponieważ jego przebieg jest zróżnicowany, a wyniki często nieporównywalne.

W poszczególnych krajach UE zostały opracowane obszerne dokumenty opisujące metody badania reaktywności alkalicznej oraz sposób postępowania, dzięki któremu można zapobiec skutkom.

W Polsce problem na razie nie znalazł rozwiązania. Ważnym zadaniem jest sprawdzenie zastosowania w warunkach polskich nowych metod badań i oceny reaktywności kruszyw opracowanych w RILEM TC 191. System, który będzie funkcjonował w Polsce powinien, tak jak jest to w innych europejskich krajach, polegać na wielostopniowej ocenie potencjalnej reaktywności alkalicznej. Pierwszym etapem oceny musi być właściwy opis petrograficzny, który pozwala na zakończenie oceny na tym etapie (kruszywa niereaktywne), bądź skierowanie na właściwą ścieżkę procesu oceny. Przy wyborze metod badawczych należy skupić się na metodach rekomendowanych przez RILEM, ponieważ takie metody będą funkcjonowały w Unii Europejskiej. Wprowadzanie innych metod, np. opartych na ASTM, będzie dodatkowym obciąże-

niem dla polskich producentów oraz może stanowić barierę w wolnych uczestnictwie w rynku kruszyw. □

Piśmiennictwo

1. *Project funded by the European Community under the „Competitive and Sustainable Growth” Programme (1998-2002).*
2. *Alkali-Reactivity & Prevention. Assessment, Specification And DIAGNOSIS. Draft AAR-6, 2007.*
3. *Góralczyk S.: Reaktywność kruszyw ze skał węglanowych. Praca doktorska, 2000.*
4. *RILEM TC 219 ACS Alkali-Aggregate Reactions in Concrete Structures (Reakcje alkali-kruszywa w strukturach betonu).*
5. *PARTNER „European Standard Tests to Prevent Alkali Reactions in Aggregates” (Europejskie normowe badania zapobiegania reakcjom alkalicznym w kruszywach „PARTNER”).*
6. *RILEM Recommended Test Method: AAR-0, Outline Guide to the Use of RILEM [7] Methods in Assessments of Alkali-Reactivity Potential of Aggregates.*
7. *RILEM RECOMMENDED TEST METHOD: AAR-1 Petrographical Examination.*
8. *RILEM RECOMMENDED TEST METHOD: AAR-2, Detection of potential alkali-reactivity – Accelerated mortar-bar test method for aggregates.*
9. *RILEM RECOMMENDED TEST METHOD: AAR-3, Detection of potential alkali-reactivity– 38°C test method for aggregate combinations using concrete prisms.*
10. *RILEM RECOMMENDED TEST METHOD: AAR-4.1, Detection of potential alkali-reactivity – 60°C test method for aggregate combinations using concrete prisms.*
11. *RILEM RECOMMENDED TEST METHOD: AAR-5: Rapid Preliminary Screening Test for Carbonate Aggregates.*