



Ocena kruszyw granitowych stosowanych do betonu pod względem wystąpienia potencjalnej reaktywności alkalicznej

Wiktor Jasiński¹, Andrzej Duszyński¹, Łukasz Jórdeczka¹, Aneta Pryga-Szulc¹

Assessment of granite aggregates applied to concrete in respect of the occurrence of potential alkaline reactivity. *Prz. Geol.*, 68: 759–763; doi: 10.7306/2020.31

Abstract. The study deals with granite aggregates of various fractions, originating from Polish and foreign deposits, used for concrete in communication engineering. The article discusses the issue of cement reaction with granite aggregate during exposure under specific climatic conditions and how it affects the durability of concrete structures. Granite aggregates were used to prepare concrete beams that were subjected to research analysis according to PN-EN and ASTM. Particular attention was paid to processes occurring between reactive minerals (including chalcedony, opal, tridymite, and highly-strained quartz) and the alkalis present in cement. Research methods and results of alkaline reactivity tests on granite aggregate trabecula are presented. They were carried out at the Concrete and Aggregate Division of the Road and Bridge Research Institute – Wrocław Branch. The paper also presents the analysis of research results and criteria to which potentially reactive aggregates are subject.

Keywords: AAR alkali-silica reaction, potentially reactive minerals, concrete, granite aggregate

Kruszywo stanowi co najmniej 3/4 objętości betonu i jego właściwości w dużym stopniu wpływają na cechy fizyczno-wytrzymałościowe i trwałościowe betonu w konstrukcji. Najczęściej stosowane do betonów konstrukcyjnych i nawierzchniowych jest kruszywo naturalne: żwiry i piaski, oraz kruszywo pochodzenia magmowego: granitowe i bazaltowe (Jasiński, Duszyński, 2015). Kruszywa granitowe mają zmienne właściwości fizyczno-mechaniczne, w zależności od złoża, i są zaliczane do kruszyw bardzo dobrych lub średnich. Zróżnicowanie dotyczy głównie odporności na ścieranie i rozdrabnianie (Duszyński i in., 2014). Generalnie kruszywa ze skał granitowych są uznawane za odporne na czynniki klimatyczne i dlatego z powodzeniem są stosowane do produkcji betonów konstrukcyjnych.

Jednym z czynników powodujących niszczenie i rozpad konstrukcji betonowych są reakcje zachodzące pomiędzy reaktywnymi minerałami (chalcedon, opal, trydymit, mikrokrystaliczny kwarc, kwarc w stanie naprężeń *highly-strained quartz*) a alkaliem zawartym w zaczynie cementowym. Proces reaktywności alkalicznej przebiegający w betonach jest niebezpieczny ze względu na powolną i długotrwałą destrukcję konstrukcji betonowych (Jasiński, Barczuk, 2008).

Według Komitetu Technicznego RILEM TC ARP Alkali Reactivity and Prevention-Assessment, Specification and Diagnosis, który powstał w celu realizacji badań związanych ze zjawiskiem potencjalnej reaktywności alkalicznej, kruszywa dzieli się na reaktywne oraz niereaktywne. Kruszywa reaktywne to takie, w których występują reakcje z alkaliem zazwyczaj pochodzącymi z zaczynu cementowego i znajdującymi się w roztworze porowym w betonie, tworzące się jako ekspansywna reakcja wewnątrz ziarn kruszywa. W zależności od stopnia reaktywności dzieli się je na wysoko reaktywne, słabo reaktywne lub o spowolnio-

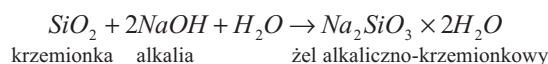
nej reaktywności oraz reaktywne kruszywa węglanowe. W zależności od rodzaju i zawartości w kruszywach składników reaktywnych podzielono je na trzy klasy:

- klasa I – kruszywo zawierające 95% lub więcej składników niereaktywnych,
- klasa II – kruszywo, zawierające poniżej 95% składników niereaktywnych lub/i do 1% opalu lub inne minerały wysoko reaktywne,
- klasa III – kruszywo zawierające minimum 1% opalu lub inne minerały wysoko reaktywne.

W kruszywach należących do klasy II i III na podstawie udziału w skałach reaktywnych składników pochodzenia krzemionkowego lub węglanowego wydzielono podklasy:

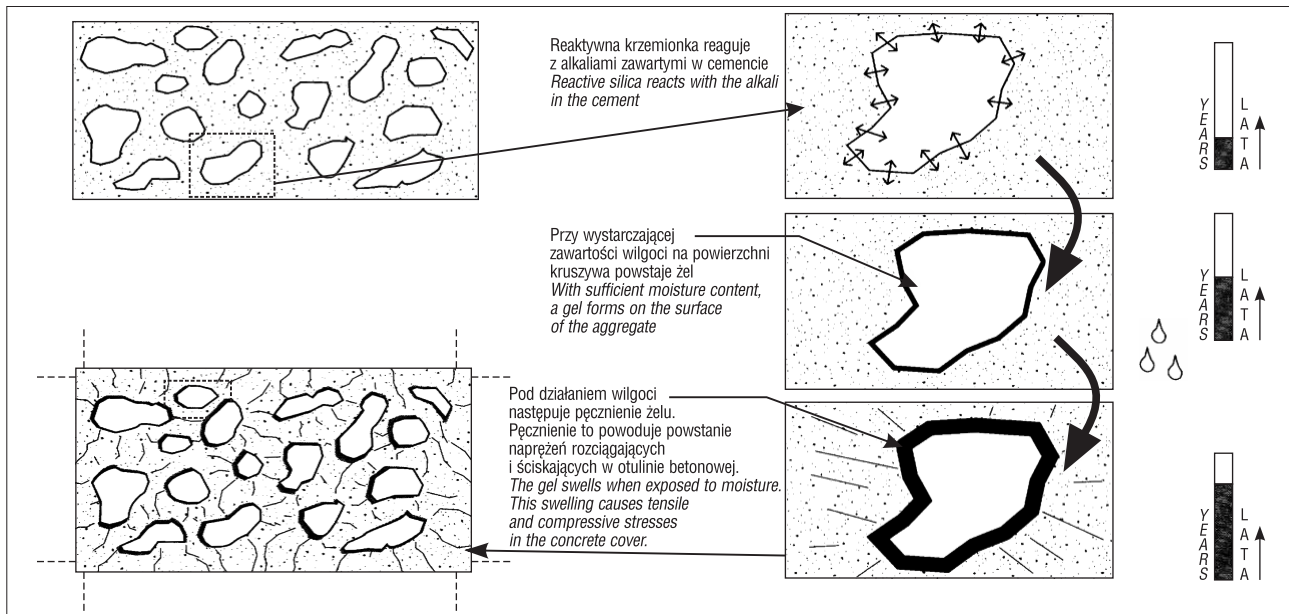
- klasy II-S i III-S – kruszywo zawierające składniki mogące wywoływać reakcje alkalia–krzemionka,
- klasy II-C i III-C – kruszywo zawierające składniki mogące wywoływać reakcje alkalia–węglany,
- klasy II-S.C i III-S.C – kruszywo zawierające składniki, które mogą wywoływać jednoczesne występowanie reakcji alkalia–krzemionka i alkalia–węglany (Budny, Góralczyk, 2001).

Istotą tych reakcji jest pęcznienie produktów reakcji, powstające na skutek pochłaniania wilgoci (Poole, 1992). W czasie pochłaniania wody następuje wzrost objętości, który powoduje wytworzenie ciśnienia wystarczającego do powstawania pęknięć w betonie (ryc. 1). Reakcja ta przebiega zgodnie ze wzorem:



Reakcja tego typu zachodzi powoli i zazwyczaj mija kilka lat zanim uszkodzenie jest widoczne (ryc. 2).

¹ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Filia Wrocław, 55-140 Żmigród; wjasinski@ibdim.edu.pl; aduszynski@ibdim.edu.pl; ljordeczka@ibdim.edu.pl; apryga@ibdim.edu.pl



Ryc. 1. Schemat przedstawiający zjawisko reakcji alkalia-krzemionka (Czarnecki, Emmons, 2002)
Fig. 1. Diagram of alkali-silica reaction (Czarnecki, Emmons, 2002)



Ryc. 2. Typowe objawy w betonie wywołane potencjalną reakcją alkalia-krzemionka – pęknięcia i mikropeęknięcia. Fot. W. Jasiński
Fig. 2. Cracks and microcracks in concrete caused by potential alkali-silica reaction. Photo by W. Jasiński

CEL I ZAKRES PRACY METODY BADAWCZE

Głównym celem pracy było przedstawienie wpływu minerałów potencjalnie reaktywnych, mogących występować w kruszywie granitowym, na możliwość zastosowania ich do betonu wykorzystywanego w inżynierii komunikacyjnej. Badania przeprowadzono w Pracowni Betonów i Kruszyw Instytutu Badawczego Dróg i Mostów Filli Wrocław (IBDiM) na kruszywach granitowych pochodzących z dziesięciu krajowych złóż i jednym z Ukrainy, na frakcjach 2–8, 8–16 i 16–22 mm. Niektóre beleczki do badań wykonano z mieszanki kruszyw 2–8, 8–16, 16–22 mm, a niektóre z pojedynczych ww. frakcji. Łącznie wykonano i zbadano 48 beleczek betonowych wg PN-91/B-06714-34A1:1997 i 36 wg ASTM C1260-14.

Tab. 1. Maksymalne dopuszczalne zawartości minerałów potencjalnie reaktywnych wg ASTM C 295
Table 1. Maximum content level of materials liable to reactivity acc. to ASTM C 295

Lp. No.	Mineral Mineral	Wartość max. Maximum value [%]
1	kwarc w stanie naprężenia lub mikrokrystaliczny kwarc highly-strained quartz or microcrystalline quartz	5,0
2	chalcedon chalcidony	3,0
3	trydymit lub krystalobalit tridymite or cristobalite	1,0
4	opal opal	0,5
5	szkliwo wulkaniczne volcanic glaze	3,0

W ramach badań wykonano szczegółowe analizy petrograficzne wg PN-EN 932-3 przedmiotowych kruszyw, ze szczególnym naciskiem na uwzględnienie występowania minerałów potencjalnie reaktywnych, które są opisane w ASTM C 295-03. Na podstawie makroskopowej i mikroskopowej analizy petrograficznej, stanowiącej wstępne rozpoznanie w kierunku potencjalnej reaktywności alkalicznej, wytypowano materiał do dalszych analiz specjalistycznych na beleczkach betonowych. Badania wykonano wg dwóch metod badawczych: PN-91/B-06714-34/A1:1997 i ASTM C1260-14.

Zgodnie z wymaganiami normy ASTM C 295-03 maksymalne dopuszczalne zawartości wymienionych wcześniej minerałów potencjalnie reaktywnych zawierających w swoim składzie mikrokrystaliczną krzemionkę przedstawiono w tabeli 1.

Metoda badania reaktywności alkalicznej według PN-91/B-06714-34/A1:1997 polega na wykonaniu 6 beleczek betonowych o wymiarach 25 × 25 × 250 mm i przetrzymywaniu ich w komorze klimatycznej w pozycji pionowej nad lustrem wody o temperaturze 36–40°C i wilgotności >85% przez minimum 180 dni. Do wykonania beleczek do badań stosowano cement CEM I 42,5R o zawartości Na₂O_{eq} = 1,3% oraz kruszywo, które zostało przesiane

przez sита o oczkach od 0,125 do 4,0 mm. Norma PN-91/B-06714-34/A1:1997 podaje, że beleczki powinny być wykonane z cementu portlandzkiego marki 35 o zawartość alkaliów w przeliczeniu na Na_2O $1,2 \pm 0,1\%$.

Oznakowane beleczki należy mierzyć przyrządem Grafa-Kaufmanna z dokładnością do 0,001 mm (ryc. 3) w 14, 28, 60, 90 i 180 dniu od zaformowania. Przed każdym pomiarem przyrząd pomiarowy należy wyzerować za pomocą pręta wzorcowego, a beleczki wyjąć z komory i przetrzymać w temperaturze od 18 do 22°C, zabezpieczone przed utratą wilgotności przez ok. 5 h.

Wynikiem badania jest obliczenie średniej zmiany liniowej długości beleczek r_{an} za pomocą wzoru:

$$r_{an} = \frac{l_n - l_1}{250 - l_1} \cdot 100$$

gdzie:

l_n – wynik n pomiaru [mm],

l_1 – wynik pierwszego pomiaru,

oraz opis makroskopowy zmian powierzchniowych próbek badawczych.

Metoda badania reaktywności alkalicznej wg ASTM C1260-14 polega na wykonaniu 3 beleczek betonowych o wymiarach 25 × 25 × 250 mm i przechowywaniu ich w roztworze wodorotlenku sodu (NaOH) (każdy litr roztworu powinien zawierać 40 g NaOH) w temperaturze



Ryc. 3. Pomiar długości beleczek betonowych za pomocą przyrządu Grafa-Kaufmanna wg PN-B-06714-34/A1:1997. Fot. Ł. Jórdeczka

Fig. 3. Measurement of changes in the length of concrete beams using the Graf-Kaufmann device acc. to PN-B-06714-34/A1:1997. Photo by Ł. Jórdeczka

80°C przez 14 dni. Do wykonania beleczek do badań stosowano cementy CEM I 42,5R o zawartości $\text{Na}_2\text{O}_{eq} = 1,3\%$. Norma ASTM C1260-14 zawiera informację, że zawartość alkaliów w cemencie ma zanedbywalny lub niewielki wpływ na zmiany liniowe w tym badaniu. Zmiana długości beleczek mierzona za pomocą przyrządu Grafa-Kaufmanna jest wykonywana co najmniej raz w ciągu tygodnia. Czas, w którym próbki przebywają poza kąpielą, nie może być dłuższy niż 10 min. Po 14 dniach przetrzymywania próbek w roztworze należy obliczyć średni wynik przyrostu długości próbek. Jeśli wynik badania po 14 dniach w roztworze NaOH jest mniejszy od 0,1%, to można uznać, że brak jest potencjalnie szkodliwego działania reaktywności alkalicznej. Jeżeli średni wynik dla 3 próbek mieści się między 0,10 a 0,20%, to należy wydłużyć okres badania do 28 dni i uznać, że może być to przejaw działania składników potencjalnie szkodliwych.

WYNIKI BADAŃ

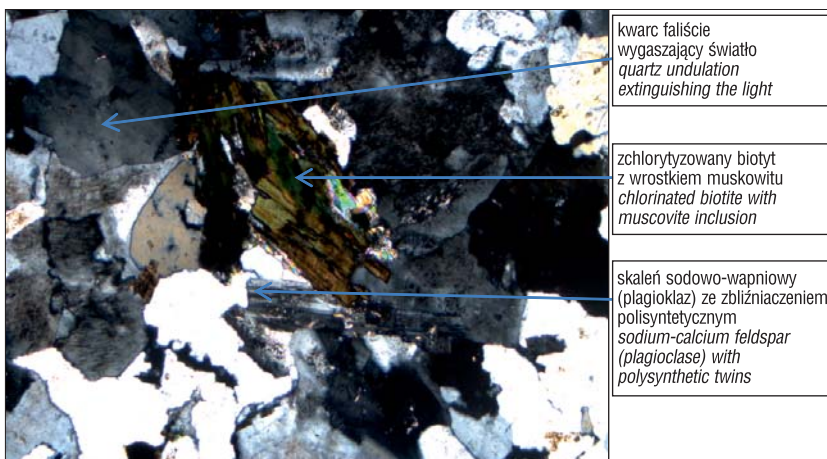
Poniżej zaprezentowano wyniki badań próbek z kruszywami granitowymi badanymi według PN-EN 932-3, PN-91/B-06714-34/A1:1997 i ASTM C1260-14.

Składniki potencjalnie reaktywne na podstawie analizy petrograficznej wg PN-EN 932-3

W literaturze i dostępnych wytycznych czy normach, granit występuje i jest klasyfikowany jako rodzaj skały, która w swoim składzie może zawierać minerały potencjalnie reaktywne w takiej ilości, która mogłaby wpłynąć na powstawanie procesu AAR (np. RILEM Recommended Test Method AAR-1, tab. A.1.2). Należą do nich opal, chalcodon, mikrokrystaliczny kwarc, kwarc w stanie naprężeń *highly-strained quartz* (AAR-1, tab. A.1.2, A.1.3) (RILEM, 2003). Analiza mikroskopowa niektórych próbek kruszywa granitowego wykonana na szlifach cienkich wykazała obecność ziarn kwarcu, z których część (poniżej 20% ziarn) wykazała tendencję do falistego wygaszania światła (ryc. 4), co może być objawem stanu naprężeń kwarcu (*highly-strained quartz*). Kąt falistego wygaszania światła w badanych ziarnach kwarcu wynosił do 15°. Według Owsiak kruszywa zawierające 20% kwarcu w stanie naprężeń *highly-strained quartz* z kątem falistego wygaszania powyżej 15° wykazują potencjalną reaktywność w procesie ASR (Alkali-Silica Reaction). Natomiast wg Farny i Kerkhoffa zagrożenie z uwagi na ASR stanowi już zawartość ponad 5% kwarcu w stanie naprężeń *highly-strained quartz* występującego w granitach, gnejsach, argilitach, szarogłazach, fyllicach, mułowcach i niektórych naturalnych piaskach i żwirach (Józwiak-Niedźwiedzka i in., 2017). Niektóre próbki badawcze zawierały również obecność minerałów nieprzeźroczystych.

Zmiany liniowe beleczek betonowych wg PN-91/B-06714-34/A1:1997

Według PN-91/B-06714-34/A1:1997 kruszywo można uznać za potencjalnie reaktywne, jeśli w okresie do 180 dni jeden z pomiarów wykonany na beleczkach betonowych przekroczy 0,1% przyrostu długości lub gdy stwierdzono występowanie rys, pęknięć, płam i wykwitów. Na rycinie 5



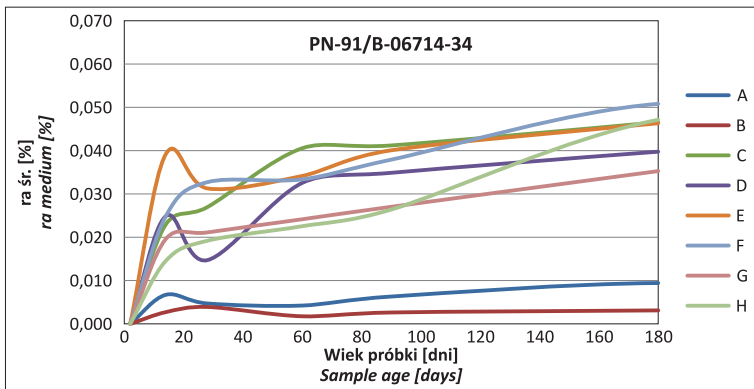
kwarc faliste
wygaszający światło
quartz undulation
extinguishing the light

zchloryzowany biotyt
z wrostkiem muskowitu
chlorinated biotite with
muscovite inclusion

skaleń sodowo-wapniowy
(plagioklaz) ze zbliżnieniem
polisyntetycznym
sodium-calcium feldspar
(plagioclase) with
polysynthetic twins

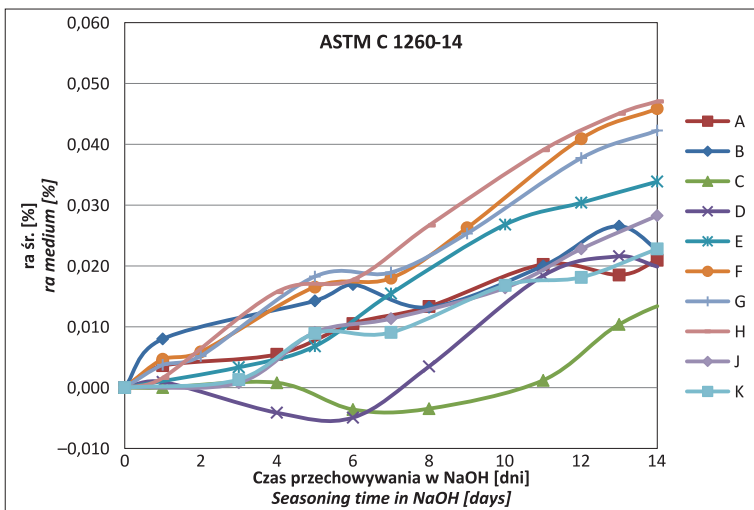
Ryc. 4. Obraz mikroskopowy skały granitowej pod mikroskopem; światło przechodzące z analizatorem, 4x/0,10

Fig. 4. View of the rock under a microscope; transmitted light with the analyzer, 4x/0,10



Ryc. 5. Zmiany liniowe beleczek betonowych po 180 dniach przetrzymywania w łaźni wodnej wg PN-91/B-06714-34/A1:1997

Fig. 5. Linear changes of concrete beams after 180 days of keeping in a water bath acc. to PN-91/B-06714-34/A1:1997



Ryc. 6. Zmiany liniowe beleczek betonowych po 14 dniach przetrzymywania w roztworze NaOH wg ASTM C 1260-14

Fig. 6. Linear changes of concrete beams after 14 days keeping in NaOH solution acc. to ASTM C 1260-14

przedstawiono średnie zmiany liniowe z 6 beleczek betonowych wykonanych z ośmiu kruszyw granitowych (A–H) przetrzymywanych przez okres 180 dni w łaźni wodnej.

nie wykazało zmian powierzchniowych charakterystycznych dla przebiegu procesu reakcji alkalicznych ani zmian liniowych długości przyrostu na poziomie powyżej 0,1%.

Uzyskane wyniki badań pokazały, że żadna z beleczek betonowych poddanych badaniu nie przekroczyła 0,1% przyrostu długości oraz na żadnej z nich nie stwierdzono występowania rys, pęknięć, plam i wykwitów. Maksymalna zmiana liniowa wynosiła 0,05 % dla beleczki betonowej oznaczonej literą F.

Zmiany liniowe beleczek betonowych wg ASTM C 1260-14

Według ASTM C 1260-14 kruszywo można uznać za potencjalnie reaktywne, jeśli w okresie 14 dni przetrzymywania w roztworze NaOH w 80°C któryś z pomiarów wykonany na beleczkach betonowych przekroczy 0,1% przyrostu długości. Na rycinie 6 przedstawiono średnie zmiany liniowe z 3 beleczek betonowych wykonanych z dwunastu kruszyw granitowych (A–L) przetrzymywanych przez okres 14 dni w roztworze NaOH. Uzyskane wyniki badań pokazały, że żadna z beleczek betonowych poddanych badaniu nie przekroczyła 0,1% przyrostu długości. Maksymalna zmiana liniowa wynosiła 0,047% dla beleczki betonowej oznaczonej literą H. W początkowej fazie badań dla beleczek betonowych oznaczonych literą C i D wystąpił skurcz.

Metoda wg ASTM C1260-14 jest obecnie powszechnie praktykowana do szybkiej oceny potencjalnej reaktywności kruszyw i posłużyła też do opracowania procedury badawczej GDDKiA nr PB/1/18.

WNIOSKI

Przedmiotem badań były kruszywa granitowe o różnych frakcjach, pochodzące z polskich i zagranicznych złóż, stosowane do betonu w inżynierii komunikacyjnej. Analiza mikroskopowa niektórych próbek kruszywa granitowego wykonana na szlifach cienkich w świetle przechodzącym wykazała obecność ziaren kwarcu, z których część wykazała tendencję do falistego wygaszania światła, co może być objawem stanu naprężeń kwarcu (*highly-strained quartz*). Według RILEM Recommended Test Method AAR-1 (tab. A.1.3) kwarc w stanie naprężeń jest zaliczany do minerałów potencjalnie reaktywnych, tak jak inne mikro- i kryptokrystaliczne formy krzemionki. Również granity wg tej klasyfikacji są zaliczane do typu skał zawierających minerały potencjalnie reaktywne.

Na podstawie przeprowadzonych badań beleczek betonowych wg PN-B-06714-34/A1:1997 i ASTM C 1260-14 można stwierdzić, że kruszywo granitowe, będące przedmiotem badań,

Nie oznacza to jednak, że nie ma konieczności dalszej systematycznej kontroli badanych kruszyw granitowych stosowanych do betonu w inżynierii komunikacyjnej w kierunku monitorowania potencjalnych procesów reakcji ASR.

Jednocześnie w Pracowni Betonów i Kruszyw IBDiM są prowadzone badania w kierunku stwierdzenia lub wykluczenia procesów reakcji ASR dla kruszyw metodą polegającą na badaniu 3 beleczek betonowych o wymiarach $75 \times 75 \times 250$ mm i przetrzymywaniu ich w komorze o temperaturze $38 \pm 2^\circ\text{C}$ przez okres 365 dni (wg ASTM C 1293-01). Metoda ta jest coraz częściej stosowana w Polsce, na jej podstawie opracowano procedurę badawczą GDDKiA.

Badania petrograficzne wykonywane dla kruszyw stosowanych w inżynierii komunikacyjnej są jednym z najważniejszych badań klasyfikujących kruszywo do betonów, szczególnie betonów nawierzchniowych i konstrukcyjnych. Badania petrograficzne wykonywane przez wykwalifikowanych specjalistów pozwalają na dobór odpowiednich kruszyw, które mają wpływ na parametry wytrzymałościowe i trwałościowe konstrukcji i obiektów infrastruktury komunikacyjnej.

Autorzy bardzo serdecznie dziękują prof. dr. hab. inż. Mirosławowi Graczykowi i anonimowemu Recenzentowi za wnikliwe recenzje i cenne uwagi oraz całej Redakcji Przeglądu Geologicznego.

LITERATURA

- ASTM C 1260-14 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).
 ASTM C 1293-01 Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction.
- ASTM C 295-03 Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete.
 BUDNY E., GÓRALCZYK S. 2001 – Nowe metody badań i oceny reaktywności alkalicznej kruszyw w UE. *Mat. Bud.*, 351.
 DUSZYŃSKI A., JASIŃSKI W., PRYGA-SZULC A. 2014 – Badanie wytrzymałości na ściskanie wybranych krajowych i zagranicznych surowców skalnych używanych do produkcji wyrobów galanterii drogowej. *Drogownictwo*, 3: 88–91.
 CZARNECKI L., EMMONS P.H. 2002 – Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. *Polski Cement*, Kraków.
 JASIŃSKI W., BARCZUK A. 2008 – Reakcja alkalia-krzemionka na przykładzie betonów z kruszywem naturalnym z obszaru północnej Polski. *Drogi i Mosty*, 1–2: 59–72.
 JASIŃSKI W., DUSZYŃSKI A. 2015 – Potencjalna reaktywność alkaliczna kruszyw i jej wpływ na bezpieczeństwo użytkowania betonowych i żelbetonowych konstrukcji inżynierskich. *Logistyka*, 4/15: 3820.
 JÓZWIĄK-NIEDZWIEDZKA D., GIBAS K., GLINICKI M.A. 2017 – Rozpoznanie petrograficzne minerałów reaktywnych w kruszywach krajowych i ich klasyfikacja zgodnie z zasadami RILEM i ASTM. *Drogi i Mosty*, 16: 223–239.
 POOLE A.B. 1992 – Alkali-Silica Reactivity, mechanism of gel formation and expansion. *Proceedings on 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, London.
 PN-91/B-06714-34 Kruszywa Mineralne. Badania. Oznaczanie reaktywności alkalicznej (zmiana A1).
 PN-B-91-06714-34/A1:1997 Kruszywa Mineralne. Badania. Oznaczanie reaktywności alkalicznej (zmiana A1).
 PN-EN 932-3:1999+A1:2004 Badania podstawowych właściwości kruszyw. Procedura i terminologia uproszczonego opisu petrograficznego. PROCEDURA Badawcza GDDKiA PB/1/18 Instrukcja badania reaktywności kruszyw metodą przyspieszoną w 1 M roztworze NaOH w temperaturze 80°C .
 RILEM 2003 – Recommended Test Method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Petrographic method. *RILEM TC 191-ARP Materials and Structures*, Vol. 36, August–September 2003: 480–496.
 RILEM Recommended Test Method AAR-1 Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Petrographic method.
- Praca wpłynęła do redakcji 25.06.2020 r.
 Akceptowano do druku 2.09.2020 r.