



WITOLD ZAPAŚNIK

Generalna Dyrekcja Dróg
Krajowych i Autostrad
wzapasnik@gddkia.gov.pl

Metody badań uszkodzeń betonu cementowego spowodowanych reakcjami AAR na przykładzie norm amerykańskich

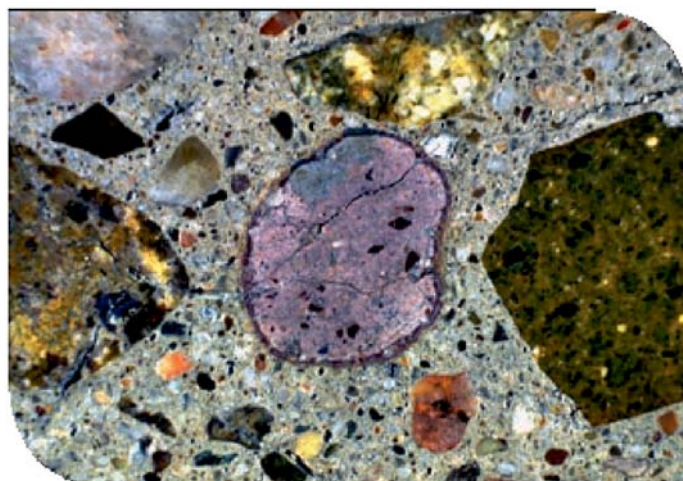
Niniejszy artykuł jest kontynuacją publikacji zamieszczonych we wcześniejszych numerach „Drogownictwa” nr 8 i 9 z 2015 roku, opisujących mechanizmy powstawania oraz czynniki sprzyjające zajściu reakcji alkaliów z kwasem krzemowym (ASR) lub alkaliów z węglanami (ACR) w betonie. W latach 40-tych i 50-tych XX wieku zostało opracowanych szereg metod identyfikacji potencjalnie reaktywnych mieszanek cementów z kruszywami, w latach 90-tych opracowano nowsze metody badań. Każde badanie posiada zalety i wady, jak również ograniczenia do stosowania. Zostały one opisane w dalszej części artykułu. W końcowej części artykułu w tabelach nr 1 i 2, dla każdej z metod badań zestawiono szczegóły dotyczące m.in. warunków badania, wymaganej liczby próbek oraz kryteria pomiarowe.

Metody identyfikacji uszkodzeń spowodowanych procesem ASR

Podczas diagnozowania uszkodzeń betonu, istnieje wysokie prawdopodobieństwo stwierdzenia w nim obecności produktu żelowego. Kluczową sprawą jest powiązanie powstałych w betonie uszkodzeń oraz zachodzących w nim reakcji ASR. W niektórych przypadkach występuje sytuacja, gdy tworzące się duże ilości żelu nie powodują uszkodzeń betonu. Dlatego ważne jest, aby w analizie uszkodzeń betonu, uszkodzenia takie jak mikrospeknięcia oraz oddzielenie kruszywa od zaczynu cementowego, zostały prawidłowo zdiagnozowane jako skutek oddziaływania żelu powstałego w wyniku reakcji ASR (jeżeli jest to rzeczywisty powód). Nie powinny być bowiem wykluczone inne przyczyny powstania uszkodzeń.

W celu jednoznacznego wskazania reakcji ASR jako przyczyny zaistniałych uszkodzeń, należy sprawdzić obecność żelu związanego z tego typu reakcją. Należy także sprawdzić i inne właściwości betonu, ponieważ reakcja ASR może być również przypisana innym typom uszkodzeń w betonie. Obszar ekspansywnej reakcji ASR mogą stanowić ziarna kruszywa, które są potencjalnie reaktywne lub których reaktywność została rozpoznana oraz te, które zostały chociaż częściowo zastąpione przez żel (fot. 1).

Ziarna kruszywa grubego skutkiem reakcji ASR zwykle wykazują speknięcia wewnętrzne, rozciągające się aż do otaczającej matrycy cementowej. W przypadku gdy reaguje tylko kruszywo drobne, speknięcia mogą utworzyć się w samej matrycy i nie wpływają na ziarna kruszywa grubego.



Fot. 1. Ziarna reaktywne są widoczne jako ciemne obszary, które wskazują na obecność żelu powstałego w wyniku reakcji ASR (wewnątrz ziaren lub wzdłuż krawędzi ziaren), speknięcia rozciągające się od ziaren kruszywa do otaczającego zaczynu oraz produkty reakcji z żelem ASR [1]

Żel może występować w speknięciach i w wolnych przestrzeniach, jak również w obszarach wokół krawędzi ziaren kruszywa. Siatka speknień wewnętrznych, łączących reaktywne ziarna kruszywa jest dowodem, że speknięcia te powstały w wyniku reakcji ASR.

Badanie petrograficzne (wg ASTM 856 lub AASHTO T 299) jest najlepszą metodą identyfikacji uszkodzeń, powstałych w wyniku reakcji ASR w betonie. Przygotowane próbki betonu są poddane badaniu pod mikroskopem przez doświadczonego petrografa, w celu określenia obecności i lokalizacji w nich kruszyw reaktywnych i żelu. Żel krzemionkowy pojawia się jako ciemny obszar w ziarnie kruszywa lub wokół jego krawędzi. Petrografia zastosowana do badań kruszywa o znanej reaktywności, może potwierdzić obecność produktów reakcji ASR, a także wskazać na nią jako na przyczynę powstałych uszkodzeń.

Drugą metodą lokalizacji żelu w betonie, powstałego wskutek reakcji alkalia-krzemionka, jest procedura badania w octanie uranylu, którą omówiono w aneksie do normy ASTM C 856 (AASHTO T 299). W metodzie tej powierzchnia świeżego betonu jest poddana działaniu (pokryta sprayem) roztworu octanu uranylu, splukana wodą i następnie oceniana w świetle ultrafioletowym [4], [5]. Ziarna reaktywne oraz żel pojawiają się jako jasnożółte lub zielone plamy.

W celu właściwej interpretacji wyników, badanie w octanie uranylu zaleca się wykonać przez specjalistę z dużym

doświadczeniem. Badanie to nie rozróżnia nieszkodliwej obecności żeluzu od reaktywności, która może być szkodliwa. Również nie cała fluorescencja w tym badaniu świadczy o obecności żeluzu pochodzącego z reakcji ASR, ponieważ niektóre kruszywa odbijają światło naturalnie. Również jony uranowe mogą być absorbowane przez produkty hydratacji cementu i występować jako szerokie obszary o słabej fluorescencji. Żaden z powyższych warunków nie jest zatem wystarczającym dowodem wystąpienia żeluzu, będącym produktem wyłącznie reakcji ASR. Jako materiał powodujący minimalne zagrożenie poziomem radioaktywności, roztwór octanu uranu musi być używany zgodnie z obowiązującymi przepisami.

Trzecia i najnowsza metoda wykrywania obecności żeluzu w betonie, to metoda *Los Alamos*, która może być stosowana na budowie, jak również w laboratorium. Jest to zmodyfikowana metoda barwienia, tradycyjnie stosowana do identyfikacji skalenia potasowego w skałach, wykorzystując do tego celu roztwór sześciopowodukobaltanu sodu. W metodzie tej jeden odczynnik nakłada się na powierzchnię świeżego betonu, a następnie sprawdza się, czy występuje żółte „plamienie”, wskazujące na obecność potasu zawierającego żel. Drugi odczynnik – rodamina B, dostarcza kontrastu dla plamienia żółtego. Roztwór rodaminy B jest stosowany na zmyletej powierzchni i następnie pozostawiony aż do momentu zakończenia reakcji. W dalszej kolejności powierzchnia betonu jest ponownie splukiwana wodą. Plama z rodaminy B tworzy różowe tło z ciemniejszą jego barwą w pobliżu żółtej plamy. Różowa plama o ciemniejszej barwie odpowiada żeluzi ASR bogatemu w wapń. Według autorów badania, obecność ciemnoróżowej plamy oznacza zaawansowany lub rozwijający się stan procesu degradacji [6].

Stwierdzenie obecności żeluzu przy pomocy obydwu metod tzn. octanu uranu oraz plamienia *Los Alamos* niekoniecznie oznacza, że wystąpiło destrukcyjne zjawisko ASR. Obydwa badania są uzupełniającymi dla bardziej dokładnych badań petrograficznych oraz fizycznych w celu określenia ekspansji betonu. Metoda octanu uranu oraz metoda plamienia *Los Alamos*, nie mogą być stosowane samodzielnie w celu zdiagnozowania wystąpienia reakcji ASR [6].

Kontrola w celu zapobieżenia potencjalnej reakcji ASR w nowym betonie

Najlepszym sposobem uniknięcia szkodliwej reakcji ASR jest podjęcie odpowiednich środków ostrożności przed wbudowaniem betonu w nawierzchnię względnie przed wykonaniem konstrukcji obiektu. Z uwagi na to specyfikacje dla betonu standardowego mogą wymagać modyfikacji pod kątem zapobieżenia reakcji ASR w betonie. Modyfikacje takie powinny zostać opracowane oddzielnie dla każdego przypadku, tak aby uniknąć nadmiernych ograniczeń dla opcji proponowanych do praktycznego zastosowania w specyfikacjach. Wymaga to szczegółowego przeanalizowania w zakresie dostępnych materiałów wiążących i kruszyw oraz wyboru odpowiedniej strategii kontroli procesu wbudowania, co uczyni wybrane rozwiązanie materiałowe efektywnym i ekonomicznym.

W zależności od rejonów geograficznych kraju oraz potrzeb materiałowych, Amerykańskie Stowarzyszenie Cementowe (PCA) opracowało specyfikację wzorcową dla betonu narażonego na potencjalną reakcję alkalia-krzemionka (PCA 2007). Jest ona oparta na dokumencie NRMCA 1993, opracowanym dla rejonu Wschodniego Wybrzeża USA. Na rysunku nr 1 zilustrowano poszczególne etapy procedury badawczej, w której chodzi o ustalenie, czy w przypadku zastosowanych materiałów występuje groźba wystąpienia ich reaktywności, a na etapie użycia do betonu ograniczenie możliwości wystąpienia reakcji ASR w nowo układanym betonie.

Specyfikacja wzorcową AASHTO

Amerykańskie Stowarzyszenie Pracowników Dróg Stanowych i Transportu (AASHTO) opracowało wytyczne i procedury, w celu kontroli i przeciwdziałania potencjalnym reakcjom ASR. Na stronie internetowej pod poniższym adresem dostępny jest tzw. *Transition Plan* (<http://leadstates.transportation.org.asr/library/transition/>), który zawiera:

(1) *Raport Drogowy Agencji Stanowych określający zakres występowania reakcji ASR*;

(2) *Uaktualniony Podręcznik Identyfikacji reakcji ASR w Obiektach Drogowych, SHRP-C-315* (<http://leadstates.transportation.org.asr/library/transition/C315>);

(3) *Wzorcową Specyfikację AASHTO dla Betonu Odpornego na działanie reakcji ASR* (<http://leadstates.transportation.org.asr/library/gspec.stm>).

Wzorcowa Specyfikacja AASHTO dla Betonu Odpornego na działanie reakcji ASR zaleca następujące badania kruszyw:

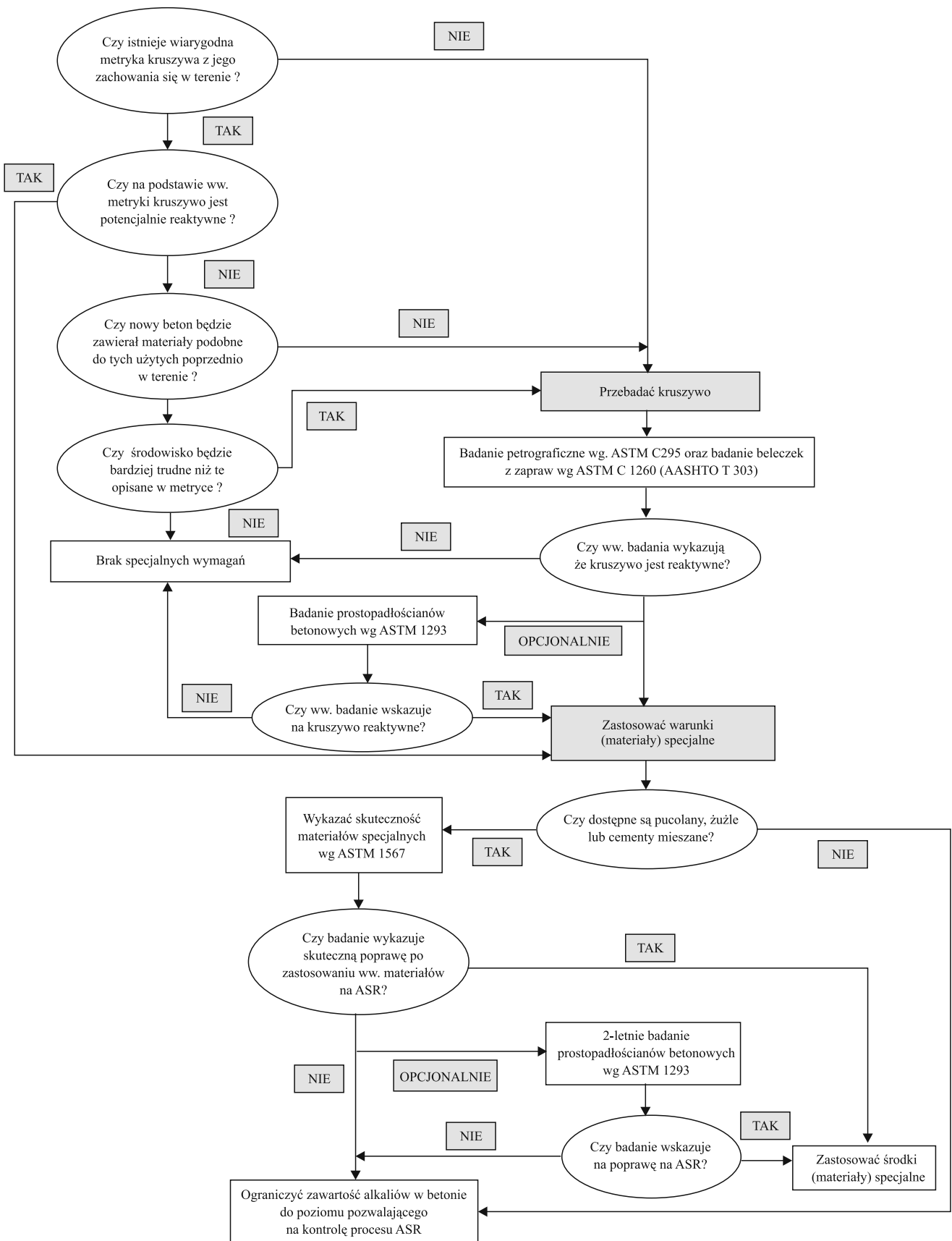
- 1) AASHTO T 303 [ASTM C 1260] (granica ekspansji 0,08% po 14 dniach dla kruszyw metamorficznych oraz 0,1% dla pozostałych),
- 2) ASTM C 1293 (granica ekspansji 0,04% po roku),
- 3) ASTM C 295, badanie petrograficzne.

Zalecane materiały do stosowania w celu ochrony przed wystąpieniem reakcji ASR w nowym betonie obejmują: (1) cementy niskoalkaliczne i/lub mieszane; (2) minimum 15% popiołu lotnego klasy F, 30% popiołu klasy C, 25% żużla lub 5% popiołu krzemionkowego zamiast cementu; (3) domieszki litowe.

Metody w celu wykazania ochrony przed działaniem szkodliwej reakcji ASR na etapie projektowania betonu zawierają:

(1) ASTM C 441 (granica ekspansji 0,10% po 56 dniach lub 0,15% po 56 dniach w przypadku gdy wynik badania kruszywa wg AASHTO T 303 był mniejszy niż 0,50%, względnie, gdy stosowane są SCM (domieszki materiałów wiążących do cementu). Odkształcenia są mniejsze niż w przypadku mieszanki kontrolnej z cementem niskoalkalicznym (pomiędzy 0,40% a 0,60%) lub w przypadku zastosowania cementów niskoalkalicznych, odkształcenie po 14 dniach jest przynajmniej o 55% niższe niż w przypadku mieszanki kontrolnej z cementem wysokoalkalicznym (1% ± 0,05%);

(2) AASHTO T 303 [ASTM C 1260] (granica ekspansji 0,08% po 14 dniach dla kruszyw metamorficznych i 0,10% dla wszystkich innych; lub (3) ASTM C 1293 (granica ekspansji 0,04% po 2 latach).



Rys. 1. Schemat blokowy obrazujący poszczególne etapy badań i przeciwdziałania procesowi ASR

Identyfikacja kruszywa potencjalnie reaktywnego

Metryka eksploatacyjna obiektu w terenie stanowi najlepszą metodę oceny podatności danego kruszywa na reakcję ASR. Przy ocenie dotychczasowego zachowania się betonu w terenie należy określić następujące parametry: (1) czy zawartość cementu w betonie, zawartość alkaliów w cemencie oraz współczynnik wodno-cementowy betonu podobne są do tych, projektowanych do zastosowania w przyszłym betonie, (2) czy beton w terenie ma przynajmniej 15 lat, (3) czy warunki ekspozycji dla betonu eksploatowanego w terenie są przynajmniej takie, jak planowane dla nowej konstrukcji i (4) czy w betonie eksploatowanym w terenie zostały zastosowane dodatki w postaci pucolan lub żużli oraz czy ich zawartość i własności są podobne do proponowanych do zastosowania w betonie projektowanym. Dodatkowo, bieżąca dostawa kruszywa powinna być przebadana pod względem petrograficznym, aby być pewnym, że jest reprezentatywna dla kruszywa, zastosowanego w betonie eksploatowanym w terenie. W przypadku gdy metryka eksploatacyjna betonu w terenie nie jest dostępna, do oceny potencjalnej reaktywności kruszywa należy wykorzystać badania laboratoryjne. Na rysunku nr 1 zilustrowano proces oceny kruszywa.

Badanie metodą beleczek z zapraw (ASTM C 227)

Metoda badawcza potencjalnej reaktywności alkalicznej mieszanek cementowo-kruszywowych (Metoda beleczek z zapraw), ASTM C 227. Mierzone są odkształcenia zapraw sporządzonych z zastosowaniem kruszywa podlegającego ocenie. Kruszywo powinno mieć uziarnienie standardowe i aby spełnić w/w wymaganie może wymagać rozdrobnienia. Można zastosować cement aktualny lub referencyjny. Zawartość alkaliów w cemencie referencyjnym powinna wynosić co najmniej 0,6% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ i najkorzystniej, aby stanowiła wartość maksymalną z wartości planowanych do zastosowania cementach. Do badań należy przygotować przynajmniej cztery belecзки o standardowych wymiarach $25 \times 25 \times 285$ mm, po dwie z każdego dwóch zarobów roboczych, stosując podane kruszywo i cement.

Belecзки są następnie przechowywane w komorze, ponad poziomem wody w warunkach 100% wilgotności względnej i w temperaturze 37,8°C. Okresowo są wykonywane pomiary zmian długości, rozpoczynając od 14 dnia i kontynuując do 12 miesięcy, ewentualnie także dłużej. Zgodnie z ASTM C 33 (AASHTO M 6/M80), maksymalne dopuszczalne odkształcenie liniowe, aby uznać kruszywo za niereaktywne, wynosi 0,10% – w przypadku okresu sześciu miesięcy lub 0,05% – w przypadku okresu trzech miesięcy. Zalecane są dłuższe okresy badawcze w celu odróżnienia reaktywności poszczególnych kruszyw. Metody tej w zasadzie nie stosuje się do badań kruszyw węglanowych.

Metoda beleczek formowanych z zapraw umożliwia określenie podatności mieszanek cementowo-kruszywowych na reakcje ASR. Jeśli ocenie nie są poddawane zdecydowanie reaktywne materiały, to uzyskanie wiarygodnych wyników może wymagać okresu 12 miesięcy lub dłuższego, chociaż niekiedy jest to trudne ze względów organizacyjnych. Czas

trwania badania jest jedną z wad metody C 227. Stwierdzono bowiem, że nawet po długim okresie badawczym nie wszystkie potencjalnie reaktywne kruszywa mogą wykazać własności ekspansywne. Badanie wg metody C 227 może być nieprzydatne przy rozróżnieniu wolno reagujących kruszyw od kruszyw całkowicie nieszkodliwych, ponieważ warunki badania nie są wystarczająco ostre, względnie konieczne byłoby wydłużenie okresu badań nawet do kilku lat. W takim wypadku pomocna okazuje się analiza petrograficzna kruszywa, umożliwiająca określenie, czy badanie to jest odpowiednie dla wolno reagujących kruszyw. Zostały zaobserwowane pewnego rodzaju zaburzenia w stosowanych warunkach przechowywania próbek. Wymagane jest wyłożenie wnętrza pojemnika odpowiednim (specjalnym) rodzajem wykładziny, w celu utrzymania wysokiej wilgotności względnej. Wykładzina o właściwościach kapilarnych powoduje kondensację wody na beleczkach, co powoduje wypłukiwanie alkaliów z zaprawy. W niektórych pojemnikach, w których zastosowano specjalną wykładzinę, zaobserwowano mniejsze odkształcenia beleczek. Pomimo że nie jest to badanie precyzyjne, jest jednak użyteczne do oceny podatności mieszanek cementowo-kruszywowych na szkodliwe reakcje ASR.

Badanie metodą chemiczną (ASTM 289)

Metoda badania potencjalnej reaktywności kruszyw (metoda chemiczna), ASTM 289, zwana jest także szybką metodą chemiczną wykorzystywaną do oceny potencjalnej reaktywności kruszyw krzemianowych. Kruszywo jest miążdżone i przesiewane, aby uzyskać trzy próbki o wadze 25 g każda. Materiał ten jest poddany reakcji z roztworem alkalicznym (1 M wodorotlenek sodu) w temperaturze 80°C. Po 24 godzinach mierzy się ilość rozpuszczonej krzemionki z kruszywa oraz obniżenie alkaliczności roztworu. Po naniesieniu uzyskanych danych na wykres, możliwe jest określenie potencjalnej reaktywności kruszywa. Kruszywo jest klasyfikowane do jednej z trzech kategorii: nieszkodliwe, szkodliwe lub potencjalnie szkodliwe.

Norma ASTM C 289 identyfikuje stosunkowo dokładnie kruszywa wysoce reaktywne, jednak jest niedokładna w przypadku identyfikacji kruszyw tzw. wolno reagujących. Również niektóre kruszywa zawierające duże ilości rozpuszczalnej krzemionki wykazują niewielkie odkształcenia eksploatacyjne. Z podanych przyczyn badanie nie zawsze daje wiarygodne wyniki [4]. Nie powinno być również stosowane do oceny kruszyw węglanowych. Badanie to jest natomiast pomocnym narzędziem i może być użyteczne przy wstępnej klasyfikacji kruszyw. Należy jednak wykonywać także inne badania, w celu stwierdzenia potencjalnej reaktywności danego kruszywa.

Badanie petrograficzne (ASTM C 295)

Skład mineralogiczny jest dobrym parametrem do określenia potencjalnej reaktywności kruszyw. Stosowany *Przewodnik dla badania petrograficznego kruszyw do betonu*, ASTM C 295, opisuje formy i składy mineralogiczne (na stronie 2 tego przewodnika omówiono źródła kruszyw oraz ich składy mineralne, podatne na reakcje ASR). Badanie pe-

trograficzne powinno być stosowane jako badanie klasyfikacyjne kruszyw. Wynik uzyskuje się szybko, co pomaga przewidzieć możliwą reaktywność kruszywa, natomiast nie daje informacji ilościowej o aktualnym zachowaniu się kruszywa w betonie.

Badanie petrograficzne próbki danego kruszywa umożliwia identyfikację potencjalnych reaktywnych minerałów w próbce kruszywa. Zapisy zawarte w normach ASTM zawierają zalecenia dotyczące wykonywania dla próbek kruszywa analizy megaskopowej (tj. wizualnej) i mikroskopowej. W normie ASTM C 294 zawarty jest także opisowy podział i klasyfikacja minerałów.

W analizie megaskopowej próbka kruszywa jest dzielona na grupy podobnych typów mineralogicznych skał. Potencjalnie reaktywne typy skał są oceniane ilościowo na podstawie całej próbki kruszywa.

Analiza mikroskopowa jest bardziej szczegółowa i czasochłonna; zwykle poddaje się badaniu mniejszą próbkę kruszywa. Do przeprowadzenia analizy stosowany jest mikroskop petrograficzny, w którym w świetle spolaryzowanym analizowane są cienkie oszlifowane próbki wycięte z kruszyw. Na próbkach kruszywa oceniany jest indeks odbicia światła oraz ciężar właściwy kruszywa rozdrobnionego. Można zastosować także bardziej zaawansowane typy mikroskopów do oceny składu mineralogicznego, takie jak mikroskop elektronowy (TEM) oraz skaningowy mikroskop elektronowy (SEM). W celu scharakteryzowania formy krystalicznej krzemionki zawartej w ziarnach kruszywa, można zastosować także techniki analityczne, tzn. dyfrakcję rentgenowską oraz spektroskopię w podczerwieni.

Analiza petrograficzna kruszyw z reguły jest czasochłonna. Ponieważ ocenia się niewielkie próbki, należy upewnić się, że próbka jest reprezentatywna dla danego źródła pochodzenia kruszywa. Korelacja wyników analizy petrograficznej z wiekiem eksploatacji kruszywa w betonie w warunkach polowych może być również bardzo użyteczna. Należy jednakże podkreślić, że wyniki analizy petrograficznej nie wykażą, czy kruszywo będzie mogło powodować szkodliwą ekspansję w betonie; musi to być ocenione stosując także i inne metody badawcze (opisane w dalszej części artykułu).

Badanie metodą szybką beleczek z zapraw (ASTM C 1260 lub AASHTO T 303)

Ocena reaktywności kruszyw metodami przyspieszonymi jest coraz szerzej stosowana. Wady metod wg norm ASTM C 227 i C 289 spowodowały opracowanie szybkiej metody badawczej do oceny potencjalnej reaktywności kruszyw. Norma ASTM C 1260 (AASHTO T 303), *Metoda badania potencjalnej reaktywności alkalicznej kruszyw (Metoda beleczek z zapraw)*, pozwala na relatywnie szybkie sprawdzenie kruszywa pod kątem jego reaktywności alkalicznej i może być traktowana jako metoda uzupełniająca dla dłuższych trwających metod. Polega ona na pomiarze zmiany długości beleczek z zapraw, sporządzonych z zastosowaniem ocenianych próbek kruszyw przechowywanych w silnie alkalicznym roztworze i w podwyższonej temperaturze.

Badanie to umożliwia ocenę potencjalnej reaktywności kruszywa, a nie reaktywność mieszanek cementowo-kruszy-

wowych. Załącznik do C 1260 (AASHTO T 303) przyjmuje zwiększenie wymiarów beleczek do 0,10% po 14 dniach, jako zachowanie nieszkodliwe. Wzrost wymiarów powyżej 0,20% wskazuje na potencjalnie szkodliwą ekspansję kruszywa. W przedziale pomiędzy 0,10% a 0,20% kruszywa mogą wykazywać nieszkodliwą, względnie szkodliwą ekspansję w warunkach rzeczywistych. Poszczególne jednostki badawcze stosują w tym zakresie odmienne kryteria, w zależności od uzyskanych doświadczeń. W przypadku gdy badania i metryka terenowej eksploatacji danego lokalnego materiału nie pokazują, że uzasadniona jest modyfikacja procedury badawczej, to w celu uzyskania najbardziej wiarygodnych wyników należy przyjmować standardowe warunki i kryteria badawcze [8]. Założony poziom ekspansji kruszywa może określać, jakie materiały należy zastosować w betonie.

Badanie według ASTM C 1260 (AASHTO T 303) powinno być stosowane wyłącznie jako badanie klasyfikacyjne w powiązaniu z innymi badaniami, w celu określenia potencjalnej reaktywności kruszywa. Z powodu ostrych warunków badania, kruszywa o dobrym zachowaniu w terenie i przy braku metryki eksploatacyjnej ASR mogą niekiedy zostać uznane za reaktywne. Dzieje się tak dlatego, że kruszywa w betonie w rzeczywistych warunkach są rzadko wystawiane na tak ostre warunki alkaliczne i temperaturowe, jakie zostały przyjęte w laboratoryjnej metodzie badawczej. W ten sposób, kruszywa zidentyfikowane jako potencjalnie reaktywne na podstawie ASTM C 1260 (AASHTO T 303) w praktyce mogą zachowywać się dobrze, przy występujących niższych poziomach alkaliów oraz w mniej ostrych warunkach temperaturowych. Ekstremalne warunki badania zastosowane w ASTM C 1260 (AASHTO T 303) sprawiają, że jest ona użyteczna do identyfikacji kruszyw wolno reaktywnych, które mogą nie zostać zidentyfikowane w badaniu wg ASTM C 227.

Zmodyfikowana wersja metody ASTM C 1260 (AASHTO T 303) ocenia efektywność stosowanych dodatków do materiałów wiążących. Procedura ta została znormalizowana jako ASTM C 1567 (patrz poniżej). Jej autorzy [8] przedstawiają dobrą korelację wyników pomiędzy badaniem metodą szybką beleczek z zapraw po 14 dniach a badaniem ekspansji próbek betonu w terenie. Stwierdzono znaczący wzrost fałszywych wyników pozytywnych i negatywnych (w porównaniu do badań betonu) dla 28 dniowej wersji badania (42%), w porównaniu do wersji standardowego badania 14 dniowego (23%).

Badanie metodą prostopadłościanów betonowych (ASTM C 1293)

Standardowa metoda badania kruszyw do betonu poprzez określenie zmian liniowych betonu z powodu reakcji alkalia-krzemionka, ASTM C 1293, rejestruje zmiany długości prostopadłościanów betonowych, sporządzonych z badanych kruszyw drobnych lub grubych i cementu wysokoalkalicznego Typu I ($0,90\% \pm 0,10\% \text{ Na}_2\text{O}_{eq}$) oraz dodatkowego NaOH, tak, aby uzyskać cement o zawartości alkaliów 1,25% Na_2O_{eq} . Proporcje składników w betonie są ściśle określone, uwzględniając wskaźnik wodno-cementowy w przedziale 0,42 do 0,45. Przy podanych proporcjach, beton ma zawartość alkaliów $5,25 \text{ kg/m}^3$. Przygotowuje się co najmniej trzy betonowe prostopadłościany o standardowych wymiarach:

75 × 75 × 285 mm. Można sporządzić także dodatkowy prostopadłościan w celu wykonania badania petrograficznego. Wszystkie prostopadłościany są przechowywane w szczelnym pojemniku ponad wodą w 100% wilgotności względnej i w temperaturze 38°C. Pomiary zmian długości są porównywane z odczytem w pierwszym dniu badania i obliczane z dokładnością do 0,001%. Pomiary są wykonywane po 7, 28, 56 dniach oraz po 3, 6, 9 i 12 miesiącach. Dodatkowe odczyty są wykonywane w przedziałach 6 miesięcznych. Dodatek X1 do normy C 1293 zawiera następującą interpretację wyników: potencjalnie szkodliwe zachowanie kruszywa stwierdza się w przypadku, gdy pomierzone jednoroczne odkształcenie liniowe (jego wartość średnia) jest większe lub równe 0,04%.

Metody badań wg C 1293 oraz wg C 227 są podobne, ponieważ w obu badane są mieszanki cementowo-kruszywowe, a w celu uzyskania wiarygodnych wyników, czas badania wynosi co najmniej rok. Metoda C 1293 jest obecnie uważana za najbardziej reprezentatywną metodę badawczą, biorąc pod uwagę wyniki badań obiektów w terenie. W stosunku do wyników badań otrzymywanych wg metod C 227, C295, C289, C1260 (AASHTO T 303) lub C 1567 metoda wg C 1293 powinna być stosowana jako uzupełniająca. Posiada ona równocześnie możliwość wyjaśnienia wyników uzyskanych na podstawie metod C 227, C 1260 (AASHTO T 303) i C 1567 w wypadku, gdy nie oczekuje się wprowadzania dodatkowych alkaliów do struktury badanego obiektu. W Kanadzie normą odpowiadającą ASTM C 1293 jest norma CSA A23.2-14A, *Potencjalna ekspansywność kruszyw (Procedura pomiaru zmiany długości spowodowanej reakcją kruszywa-alkalia w betonowych prostopadłościanach)*. W wariantcie ASTM C 1293 autorzy [7] sugerują skrócenie czasu badania z 12 miesięcy do 3 miesięcy (91 dni) przy równoczesnym podniesieniu temperatury przechowywania betonowych prostopadłościanów z 38°C do 60°C.

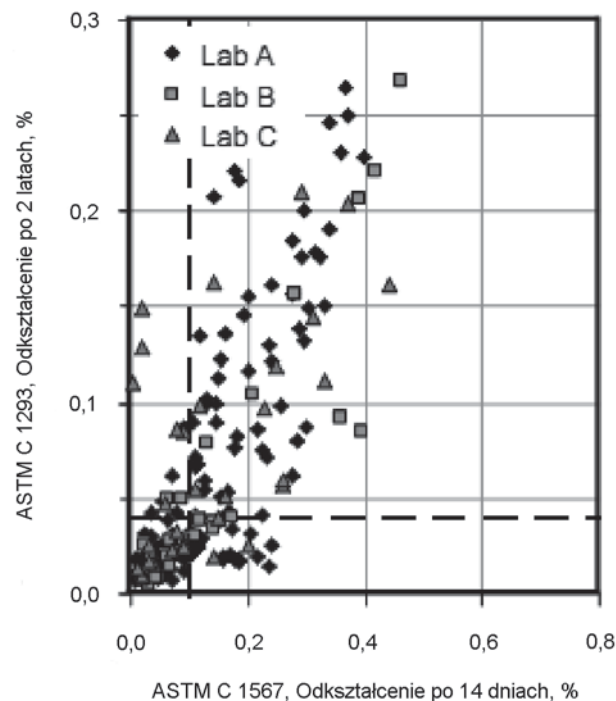
Badanie metodą przyspieszoną beleczek z zapraw (ASTM C 1567)

Metoda ASTM C 1567, *Metoda określenia potencjalnej reaktywności alkalia-krzemionka mieszanek spoiw cementowych i kruszyw (Przyspieszona metoda badania beleczek z zapraw)* ocenia ekspansję próbek sporządzonych z badanego kruszywa i cementu wieloskładnikowego lub cementu z dodatkiem pucolan lub żużla, w tych samych warunkach badania przyspieszonego jak wg normy ASTM C 1260 (AASHTO T 303). Bada się efektywność mieszanek cementu, pucolan i kruszyw. Można badać różne zawartości dodatków pucolan i sproszkowanego, granulowanego żużla wielkopieczowego w celu określenia wymaganej ilości dodatku, potrzebnej do obniżenia ekspansji betonu do poziomu akceptowalnego. Pucolany i sproszkowany, granulowany żużel wielkopieczowy mogą być badane osobno lub razem. Do celów porównawczych zaleca się zbadanie tego samego kruszywa i cementu hydraulicznego (bez dodatku pucolan i żużla) stosując metodę badania wg C 1260 (AASHTO T 303). Wyniki otrzymane z tego badania mogą zbyt wysoko oceniać reaktywność dla pewnych typów kruszyw w przypadku, gdy są one eksploatowane razem z tymi samymi pucolanami lub żużlem i cementem niskoalkalicznym. Metoda

ta również może niedoszacować ekspansji mieszanek spoiw, zawierających pucolany z zawartością alkaliów > 4% Na₂O_{eq}. Materiały takie powinny być badane zgodnie z metodą C 1293. Podobnie jak w przypadku normy ASTM C 1260 (AASHTO T 303), dodatek do normy C 1567 klasyfikuje ekspansję o wielkości mniejszej niż 0,10% po 14 dniach (16 dni po sformowaniu beleczek) dla mieszanek, jako zachowanie nieszkodliwe. Niektórzy badacze [8] wykazują dobrą zależność pomiędzy badaniem metodą przyspieszoną beleczek z zapraw po 14 dniach a ekspansją próbek betonowych stwierdzoną w terenie. Zauważają oni również znaczący wzrost fałszywych wyników pozytywnych i negatywnych (dla badań betonu), w stosunku do 28 dniowej wersji badania (42%), w porównaniu ze standardową wersją badania 14 dniowego (23%).

Porównanie pomiędzy badaniem metodą przyspieszoną beleczek z zapraw (ASTM C 1567) a badaniem metodą prostopadłościanów betonowych (ASTM C 1293)

Na podstawie wykonanych badań, naukowcy amerykańscy [8] dokonali porównania dwóch w/w metod dla różnych typów mieszanek spoiw i kruszyw. Na rysunku nr 2 przedstawiono wyniki badań przyjmując 14 dniową granicę ekspansji 0,10% wg normy ASTM 1567, w celu oceny mieszanek kruszyw reaktywnych i dodatkowych materiałów wiążących (SCM), można przewidzieć zachowanie się mieszanek kruszywa – SCM, tak jak na podstawie 2-letniego badania metodą ASTM C 1293 i przyjmując granicę ekspansji 0,04%.



Rys. 2. Porównanie wyników ekspansji mieszanek kruszywa-cementu wg badania metodą betonowych prostopadłościanów (ASTM C 1293) po 2 latach, z wynikami ekspansji tych samych mieszanek kruszywa – SCM wg badania metodą przyspieszoną beleczek z zapraw (ASTM C 1567) po 14 dniach [1],[8]

W celu potwierdzenia przydatności zastosowania mieszanek SCM-kruszywa w budownictwie, stwierdzono małe ryzyko związane z przyjęciem kryterium 14 dniowej granicy ekspansji 0,10% wg ASTM C 1567. Trzydzieściami z przebadanych 182 mieszanek zwiększyło wymiary o więcej niż 0,040% w czasie badań betonu, ale spełniło kryterium 0,10% w czasie badań zaprawy. Ryzyko wystąpienia wyższej ekspansji beleczek, co związane jest z wiarygodnością wyników, równoważone jest poprzez znacznie szybszy czas badania.

Metody badań uszkodzeń powstających w wyniku procesu ACR

W wyniku destrukcyjnej reakcji ACR w betonie zwykle tworzy się i występuje w nim brucyt ($Mg(OH)_2$). Jego obecność należy określić na podstawie analizy petrograficznej lub innych badań. Beton i skały węglanowe należy zbadać petrograficznie zgodnie z normami ASTM C 856 oraz C 295. W celu stwierdzenia wystąpienia reakcji ACR pomocne jest również laboratoryjne zbadanie ekspansji, zgodnie z normą ASTM C 586.

Reakcja ACR występuje rzadko, ponieważ skały węglanowe zawierające dolomit, kalcyt oraz inne nierozpuszczalne materiały powodujące dedolomityzację zwykle nie są stosowane jako główne składniki mieszanek kruszyw do betonów [9]. W dalszej części artykułu opisano trzy badania, powszechnie stosowane do identyfikacji kruszyw potencjalnie reaktywnych w zakresie reakcji typu alkalia-węglany. Zostały one również wymienione w Tabeli 2 na końcu niniejszego opracowania.

Badanie petrograficzne (ASTM C 295)

Badanie petrograficzne, zgodnie z ASTM C 295, może być zastosowane w celu określenia charakteru skały. Potencjalnie reaktywne kruszywa w zakresie reakcji alkalia-węglany posiadają charakterystyczną litologię, która umożliwia ich łatwą identyfikację. Skała jest uważana za reaktywną, jeśli jej układ mineralogiczny stanowi drobnoziarnista matryca kalcytu i ilitu, otaczająca romboidalne kryształy dolomitu. Bez żadnych znanych wyjątków, wszystkie skały o takiej charakterystycznej litologii rozszerzają się w środowisku alkalicznym. Również wszystkie kruszywa ze skał w betonie, który zwiększył wymiary z powodu reakcji ACR, posiadają taką charakterystyczną litologię [10]. Badanie petrograficzne identyfikuje skały podatne na działanie reakcji ACR.

Badanie metodą wyciętej próbki walcowej ze skały (ASTM C 586)

Badanie wg normy ASTM C 586, *Metoda badania potencjalnej reaktywności alkalicznej skał węglanowych do zastosowania jako kruszywa w betonie (metoda badania walca wyciętego ze skały)* może określić charakterystyki ekspansyjne dla skał węglanowych. Walec wycięty ze skały, o wymiarach 35 mm długości i 9 mm średnicy, zanurzony jest w roztworze alkalicznym (1 M NaOH) w temperaturze pokojowej. Zmiana długości próbki może być monitorowana w okresie ponad

roku, natomiast tendencje do ekspansji są zwykle widoczne już po okresie miesiąca. Dwudziestoosmiodniowa ekspansja walca skalnego wynosząca 0,10 % lub więcej, wskazuje na potencjalną reaktywność kruszywa w docelowym środowisku jego pracy.

Powyższa procedura badawcza posiada kilka wad. Trudne może być uzyskanie próbki reprezentatywnej do badań, badanie ponadto też jest zbyt długie. Jest ono wykonywane tylko jako dodatkowe w stosunku do innych badań. Ekspansywne zachowanie kruszywa do betonu może być przewidziane na podstawie metody walca wyciętego ze skały. Ekspansja betonu zależy także od innych jego zmiennych parametrów, takich jak wskaźnik wodno-cementowy, obecność alkaliów rozpuszczalnych w wodzie oraz stosunek zaprawy do kruszywa. W związku z podanymi czynnikami, wyłącznie badanie wg normy ASTM C 586 nie powinno być stosowane jako jedyne do akceptacji kruszywa do jego zastosowania w betonie [10].

Badanie próbek prostopadłościennych (ASTM C 1105 oraz CSA A23.2-14A)

Norma ASTM C 1105, *Metoda badania zmian długości betonu w wyniku reakcji alkaliów ze skałami węglanowymi*, jest najbardziej przydatna w przypadku sprawdzania potencjalnej reaktywności kruszywa, które wiadomo, że zawiera skały podatne na reakcję ACR. Do badań przygotowuje się sześć betonowych próbek o kształcie prostopadłościennym, stosując mieszanki robocze kruszyw podlegających sprawdzeniu oraz cementów. W przypadku gdy rodzaj cementu do mieszanek nie został sprecyzowany, należy zastosować Typ I lub Typ II spełniający wymagania normy ASTM C 150 (AASHTO M 85). Badanie powinno trwać przez okres roku, ale można wykorzystać krótszy okres wynoszący od 3 do 6 miesięcy w przypadku, gdy dłuższy czas badania jest niemożliwy. Wydłużenie próbki równe lub większe od 0,03% w ciągu roku, 0,025% po 6 miesiącach lub 0,015 % po 3 miesiącach wskazuje na obecność potencjalnie szkodliwego (reaktywnego) kruszywa (ASTM C 1105, Załącznik).

Badanie to umożliwia zmierzenie potencjalnej ekspansyjności mieszanek cementowo-kruszywowych, a nie tylko ekspansji samego kruszywa, jednakże jednoroczny okres trwania badania jest jego wadą. Jeśli badanie zostało wykonane na mieszance cementowo-kruszywowej, zawierającej kruszywo które wcześniej nie zostało sprawdzone petrograficznie (C 295) lub poddane badaniu na próbce walcowej wyciętej ze skały (C 586), to wtedy należy wykonać przynajmniej jedno z wyżej wymienionych badań.

Badanie Kanadyjskiego Stowarzyszenia Normalizacyjnego wg normy CSA A23.2-14A, *Potencjalna ekspansyjność kruszyw (Procedura badania zmian długości w wyniku reakcji alkalia-kruszywa na prostopadłościach betonowych)*, jest podobne do badania wg normy C 1105, ponieważ oba z nich wymagają podobnych próbek i warunków ich pielęgnacji. Ilość alkaliów w cemencie, uziarnienie kruszywa i kryteria, które wskazują na ekspansywne zachowanie się kruszywa, różnią się nieznacznie. Kanadyjska wersja badania określa dopuszczalny poziom alkaliów w cemencie do zastosowania, czyniąc badanie bardziej standardowym oraz umożliwiając porównanie wyników. Wyższy poziom alkaliów w cemencie

w normie A23.2-14A czyni badanie to bardziej restrykcyjnym od badania wg normy C 1105. Powinno ono zidentyfikować potencjalnie reaktywne skały, których może nie wychwycić badanie wg normy C 1105.

Podsumowanie

Wpływ kruszywa na zachowanie się betonu w czasie jego eksploatacji w warunkach rzeczywistych jest istotnym źródłem informacji. Jeśli warunki eksploatacji i składniki, a także całkowita zawartość alkaliów w betonie, są takie same w istniejących i planowanych konstrukcjach betonowych, wówczas nie ma potrzeby wykonywania badań kruszywa posiadającego dobrą „historię” statystykę eksploatacyjną.

W przypadkach gdy kruszywo litologicznie zmienia się znacznie w obszarze kamieniołomu lub warunki ekspozycji dla planowanej konstrukcji będą bardziej wymagające niż w obiektach wykazujących dotychczas dobre cechy, lub składniki betonu znacznie różnią się, wtedy kruszywo powinno zostać poddane badaniom.

Kruszywo spełniające wymagania normy ACM C 1260 (AASHTO T 303) oraz inne wymagania dotyczące eliminacji reakcji ASR można stosować jako kruszywo niereaktywne tzn. bez ograniczeń w stosunku do spoiw.

Kruszywo nie spełniające wymagań normy ASTM C 1260 (AASHTO T 303) lub innych badań dotyczących wystąpienia reakcji ASR, nie musi być od razu eliminowane jako składnik betonu. Szkodliwe zachowanie musi być potwierdzone poprzez statystykę eksploatacyjną lub na podstawie badania wg normy ASTM C 1293, zanim kruszywo zostanie sklasyfikowane jako potencjalnie reaktywne. Nawet wtedy, kruszywa które zostały sklasyfikowane jako potencjalnie reaktywne mogą być bezpiecznie stosowane z pucolanami, żużlami lub związkami ograniczającymi reakcje ASR, cementami miesza-

nymi lub poprzez ograniczenie całkowitej zawartości alkaliów w betonie. Inną opcją jest zmieszanie kruszywa z kruszywem niereaktywnym do poziomu, który nie jest szkodliwie reaktywny.

W obecnej postaci, metoda beleczkowa wg normy ASTM C 1260 (AASHTO T 303) lub przyspieszona metoda beleczkowa wg normy ASTM C 1567, nie są adekwatne do wykonania wiarygodnego badania wpływu rodzaju cementu portlandzkiego na przebieg reakcji ASR. Zawartość alkaliów w próbkach badawczych wzrasta tutaj w zależności od ich zawartości w roztworze, w którym są zanurzone, niezależnie od pierwotnej zawartości alkaliów w cementach przyjętych do badań.

Stosując normę ASTM C 1260 (AASHTO T 303) można uzyskać nieprawdziwe, zarówno negatywne, jak i pozytywne rezultaty badania. Nieprawdziwe wyniki negatywne występują wtedy, gdy kruszywo reaktywne jest identyfikowane jako niereaktywne, wg statystyk badania zgodnie z normą ASTM C 1260 (AASHTO T 303) nie występują one często. Większość kruszyw reaktywnych może zostać zidentyfikowana na podstawie ww. badania, ponieważ przyjęte w nim warunki do przeprowadzenia procedury badawczej są bardzo ostre. Nieprawdziwe wyniki pozytywne występują wtedy, gdy kruszywo niereaktywne jest zidentyfikowane jako reaktywne i występują bardziej powszechnie, ponieważ jak wspomniano wyżej przyjęte warunki badawcze są bardzo ostre. Koncentracja wodorotlenków alkalicznych w większości betonów występujących w obiektach w terenie jest znacznie niższa niż ta, przyjęta w normowej metodzie badawczej i jest na poziomie, który nie spowoduje szkodliwej reaktywności dla wielu kruszyw nie spełniających kryteriów normy C 1260 (AASHTO T 303). W takich przypadkach do oceny tych kruszyw należy uzyskać dodatkowe informacje (poprzez wykonanie innych badań oraz analizę danych zawartych w metrykach eksploatacyjnych obiektów).

Tabela 1. Zestawienie metod badań reaktywności typu Alkalia-Krzemionka (ASR)

Tytuł badania/ Nr normy	Cel	Typ badania	Typ próbki	Czas trwania badania	Pomiar	Kryteria	Uwagi do badania
Potencjalna reaktywność alkaliczna mieszanek cementowo-kruszywowych (metoda beleczek z zapraw) (ASTM C 227)	Badanie podatności mieszanek cementowo-kruszywowych na ekspansję wskutek reakcji z alkaliami	Beleczki z zapraw betonowych przechowywane ponad wodą w temperaturze 37,8°C i przy wysokiej wilgotności względnej	Przynajmniej 4 beleczki z zapraw o standardowych wymiarach 25×25×285 mm (1×1×11¼ cala)	Zmienny: pierwszy pomiar po 14 dniach, następnie po 1,2,3,4,5,6,9 i 12 miesiącach i potem co 6 miesięcy, po tym okresie wg ustaleń	Zmiana długości	Zgodnie z ASTM C 33, maksymalne wydłużenie 0,10% po 6 miesiącach lub w przypadku niemożności badania w tym okresie, maksimum 0,05% po 3 miesiącach	Badanie może nie spowodować znacznej ekspansji, szczególnie dla kruszywa węglanowego. Długi okres trwania badania. Ekspansja może nie być wywołana procesem AAR
Potencjalna reaktywność alkaliczna kruszyw (szybka metoda beleczek z zapraw) (ASTM C 1260/AASHTO T 303)	Badanie podatności kruszyw na szkodliwą reakcję alkalia-krzemionka w beleczkach z zapraw	Zanurzenie beleczek w roztworze alkaliów w temperaturze 80°C	Przynajmniej 3 beleczki z zapraw	16 dni	Zmiana długości	Gdy zmiana długości większa od 0,10% należy wykonać badania dodatkowe, gdy większa niż 0,20% wskazuje to na potencjalnie szkodliwą ekspansję	Bardzo szybka alternatywa dla metody C 227. Użyteczna dla kruszyw wolno reagujących lub takich, które ulegają ekspansji w późniejszej fazie reakcji

Tabela 1. Zestawienie metod badań reaktywności typu Alkalia-Krzemionka (ASR) (cd.)

Tytuł badania/ Nr normy	Cel	Typ badania	Typ próbek	Czas trwania badania	Pomiar	Kryteria	Uwagi do badania
Potencjalna reaktywność alkalia-krzemionka kruszyw (metoda chemiczna) (ASTM C 289)	Określenie potencjalnej reaktywności kruszyw zawierających krzemionkę	Próbka podlegająca reakcji z roztworem alkaliów w temperaturze 80°C	Próbki 3 – 25 gramów kruszywa łamanego i odsianego	24 godziny	Spadek alkaliczności oraz ilość rozpuszczonej krzemionki w roztworze	Punkt wykreślony na wykresie wypada w szkodliwej lub potencjalnie szkodliwej strefie	Szybkie wyniki. Niektóre kruszywa podlegają małej ekspansji, nawet gdy zawierają dużo krzemionki. Badanie niezbyt wiarygodne
Określenie zmian liniowych betonu z powodu reakcji alkalia-krzemionka (badanie prostopadłościowych betonowych) (ASTM C 1293)	Określenie potencjalnej ekspansji mieszanek cementowo-kruszywowych wskutek reakcji ASR	Betonowe prostopadłościowe przechowywane nad wodą w temperaturze 38°C	3 prostopadłościowe dla każdej kombinacji kruszywo-cement o standardowych wymiarach 75×75×285 mm (3×3×11¼ cala)	Zmienny: pierwszy pomiar po 7 dniach, następnie po 28 i 56 dniach, następnie po 3,6,9 i 12 miesiącach i potem co 6 miesięcy, po tym okresie wg ustaleń	Zmiana długości	Zgodnie z Dodatkiem XI normy, potencjalnie szkodliwie reaktywne, gdy odkształcenie równa się lub przekracza 0,04% po roku (lub 0,04% po 2 latach, gdy mają być oceniane SCM (dodatkowe materiały wiążące)	Preferowana metoda oceny. Najlepiej oddaje przebieg zachowania się materiałów eksploatowanych w terenie. Długi okres trwania dla osiągnięcia wiarygodnych wyników. Stosować jako badanie dodatkowe do C 227, C 295, C 289, C 1260 i C 1567. Podobne do CSA A 23.2 – 14A
Potencjalna zmiana objętości mieszanek cementowo-kruszywowych (ASTM C 342)	Określenie potencjalnej ekspansji mieszanek cementowo-kruszywowych wskutek reakcji ASR	Beleczki z zapraw przechowywane w wodzie w temperaturze 23°C	3 beleczki dla każdej kombinacji cement-kruszywo o standardowych wymiarach 25×25×285 mm (1×1×11¼ cala)	52 tygodnie	Zmiana długości	Zgodnie z ASTM C 33, kruszywo nie spełnia wymagań jeśli odkształcenie jest równe lub większe od 0,2% po roku	Przed wszystkim stosowana do kruszyw ze stanu Oklahoma, Kansas, Nebraska i Iowa
Efektywność pucolan lub żużli wielkopieczowych dla ochrony przed nadmierną ekspansją betonu z powodu reakcji alkalia-krzemionka (ASTM C 441)	Określenie skuteczności pucolan lub żużli dla ograniczenia ekspansji wskutek reakcji ASR	Beleczki z zapraw betonowych – z zastosowaniem szkła Pyrex jako kruszywa -przechowywane nad powierzchnią wody w temp. 37,8°C i przy wysokiej wilgotności względnej	Przynajmniej 3 beleczki z zapraw i również 3 beleczki dla mieszanki kontrolnej	Zmienny: pierwszy pomiar po 14 dniach, następnie po 1,2,3,4,6,9 i 12 miesiącach i potem co 6 miesięcy, po tym okresie wg ustaleń	Zmiana długości	Zgodnie z ASTM C 989 ograniczenie odkształcenia min. o 75% lub maksymalne odkształcenie 0,02% lub zgodnie z C 618 porównanie z badaniem na niską zawartość alkaliów	Wysoko reaktywne sztuczne kruszywo może nie w pełni odpowiadać warunkom dla kruszyw rzeczywistych – Pyrex zawiera alkalia
Składniki naturalnych kruszyw mineralnych (ASTM C 294)	Opracowanie opisowej nomenklatury dla bardziej powszechnych lub ważniejszych naturalnych minerałów – dobry początek dla przewidywania ich zachowania się w czasie	Identyfikacja wizualna	Ilość zmienna, jednakże powinna być reprezentatywna dla całego złoża	Krótki czas trwania – równy wizualnej ocenie próbek	Opis typu i zawartości minerałów w kruszywie	Nie dotyczy	Opisy te stosowane są dla charakterystyki naturalnie występujących minerałów, które tworzą złoża kruszyw naturalnych
Badanie petrograficzne kruszyw do betonu (ASTM C 295)	Określenie możliwej reaktywności kruszyw poprzez badanie petrograficzne	Wizualne i mikroskopowe badanie przygotowanych próbek – mikroskopia po analizie sitowej, badania zarysowania i działania kwasem	Zmienne w zależności od znajomości złoża: próbki walcowe średnicy od 53 do 100 mm (2¼ do 4 cale), 45 kg (100 lb) lub 300 sztuk lub 2 kg (4lb)	Krótki czas trwania – wizualna ocena próbek nie trwa długo.	Charakterystyki ziaren takie jak kształt, rozmiar, tekstura, kolor, skład mineralogiczny, stan fizyczny.	Nie dotyczy	Zwykle zawiera mikroskopię optyczną, może zawierać analizę XRD, analizę termiczną lub spektroskopię w podczerwieni – patrz C 294 dla nomenklatury opisowej

Tabela 1. Zestawienie metod badań reaktywności typu Alkalia-Krzemionka (ASR) (cd.)

Tytuł badania/ Nr normy	Cel	Typ badania	Typ próbki	Czas trwania badania	Pomiar	Kryteria	Uwagi do badania
Badanie petrograficzne stwardniałego betonu (ASTM C 856/AASHTO T 299)	Określenie procedur dla badań petrograficznych betonu stwardniałego-przydatna przy określaniu stanu lub zachowania się betonu	Badanie wizualne i mikroskopowe przygotowanych próbek	Przynajmniej jedna próbka odwiercona o średnicy 150 mm i 300 mm długości (6 cali średnica na 12 cali długości)	Krótki czas trwania – wraz z przygotowaniem próbek oraz badanie wizualne i mikroskopowe	Czy kruszywo jest znane jako reaktywne? Orientacja i geometria spękań. Czy występuje jakiś żel?	Patrz pomiar – te badanie określa czy zaszły reakcje ASR i ich wpływ na beton. Należy stosować wraz z innymi badaniami.	Próbki mogą być badane pod stereomikroskopami, mikroskopami polaryzacyjnymi, mikroskopami metalograficznymi lub SEM.
Procedura badania w octanie uranylu (ASTM C 856, Aneks)	Identyfikacja produktów ASR w stwardniałym betonie	Zaplamienie powierzchni betonu świeżego i jej ocena wizualna w świetle UV	Zmienne; odwiercane, powierzchnie szlifowane lub spękane	Natychmiastowe wyniki	Intensywność fluorescencji	Brak fluorescencji	Identyfikuje małe ilości żeluz ASR, powodującego pęcznienie lub nie. Opal, kruszywo naturalne i zaprawa węglanowa mogą świecić – należy odpowiednio zinterpretować wyniki. Badanie musi być uzupełnione o badanie petrograficzne i badania fizyczne dla określenia odkształcenia betonu
Potencjalna reaktywność alkalia-krzemionka mieszanek spoiw i kruszyw (przyspieszona metoda badania beleczek z zapraw), ASTM C 1567	Identyfikacja podatności na szkodliwą reakcję alkalia-krzemionka mieszanek cementowo-kruszywowych w beleczkach wykonanych z zapraw	Zanurzenie beleczek w roztworze alkaliów w temperaturze 80°C.	Przynajmniej 3 belecзки dla każdej mieszanki spoiwa i kruszywa.	16 dni	Zmiana długości	Gdy zmiana długości przekracza 0,10%, wskazuje to na podatność na szkodliwą ekspansję, należy zastosować także C 1293 (2-letnie badanie) dla potwierdzenia	Bardzo szybka alternatywa dla C 1293. Pozwala na ocenę dodatków do materiałów wiążących (SCM) i określenie optymalnej dawki ich dozowania

Tabela 2. Zestawienie metod badań reaktywności typu Alkalia-Węglany (ACR)

Tytuł badania/ Nr normy	Cel	Typ badania	Typ próbki	Czas trwania badania	Pomiar	Kryteria	Uwagi do badania
Potencjalna reaktywność alkaliczna skał węglanowych jako źródła kruszywo do betonu (metoda walca wyciętego ze skały) (ASTM C 586)	Badanie charakterystyk ekspansji skał węglanowych	Zanurzenie walców wyciętych ze skał w roztworze alkaliów w temperaturze 23°C	Jeden walec ze skały o długości 35 mm i średnicy 9 mm (1,38 cala długości i 0,35 cala średnicy)	Do jednego roku, jednakże tendencje do ekspansji zwykle są widoczne już po 28 dniach	Zmiana długości	Nie dotyczy	Uzyskanie próbki reprezentatywnej może być trudne. Okres badania może być długi. Uważane za badanie dodatkowe w stosunku do innych
Zmiana długości betonu z powodu reakcji alkalia-skały węglanowe (ASTM C 1105)	Określenie podatności mieszanek cementowo-kruszywowych na działanie ekspansywnej reakcji ACR	Betonowe prostopadłościanny przechowywane w temperaturze 23°C i przy wysokiej wilgotności względnej	6 betonowych prostopadłościannów o wymiarach 75×75×285 mm (3×3×11¼ cala) lub 100 mm (4 cale) płytka kwadratowa dla kruszywa o maksymalnym uziarnieniu do 50 mm (2 cale)	rok	Zmiana długości	Kruszywo jest najprawdopodobniej reaktywne jeśli zmiana długości po roku (preferowany pomiar) jest większa lub równa 0,03% (0,025% po 6 miesiącach lub 0,015% po 3 miesiącach)	Długi okres badania. Najlepiej stosowana jako sprawdzająca potencjalną reaktywność skały, która wiadomo że zawiera materiał podatny na szkodliwą reakcję ACR

Tabela 2. Zestawienie metod badań reaktywności typu Alkalia-Węglany (ACR) (cd.)

Tytuł badania/ Nr normy	Cel	Typ badania	Typ próbki	Czas trwania badania	Pomiar	Kryteria	Uwagi do badania
Potencjalna ekspansywność kruszyw (procedura zmiany długości z powodu reakcji alkalia-kruszywo w prostopadłościanach z betonu Norma Kanadyjska CSA A23.2-14A)	Określenie potencjalnej reaktywności zarówno dla kruszyw grubych, jak i drobnych	Betonowe prostopadłościany przechowywane ponad wodą w temperaturze 38°C	3 prostopadłościany 75×75×285 mm (3×3×11¼ cala i dodatkowy (czwarty) prostopadłościan, może być uformowany w celu wykonania badania petrograficznego	rok	Zmiana długości	Kruszywo jest najprawdopodobniej reaktywne jeśli zmiana długości po roku jest większa niż 0,04%	Długi okres badania. Stosować wraz z innymi danymi takimi jak wyniki z badania petrograficznego. Badanie podobne do ASTM C 1293
Składniki naturalnych kruszyw mineralnych (ASTM C 294)	Opracowanie opisowej nomenklatury dla bardziej powszechnych lub ważniejszych naturalnych minerałów – dobry początek dla przewidywania ich zachowania się	Identyfikacja wizualna	Ilość zmienna, jednakże powinna być reprezentatywna dla całego złoża	Krótki czas trwania badania – tak jak zajmie to wykonanie wizualnej oceny próbki	Opis typu i zawartości minerałów w kruszywie	Nie dotyczy	Opisy są stosowane dla charakterystyki naturalnie występujących minerałów, które tworzą złoża kruszyw naturalnych
Badanie petrograficzne kruszyw do betonu (ASTM C 295)	Określenie możliwej reaktywności kruszyw poprzez badanie petrograficzne	Wizualne i mikroskopowe badanie przygotowanych próbek – mikroskopia po analizie sitowej, badania zarysowania i działania kwasem	Zmienne w zależności od znajomości złoża: próbki walcowe średnicy od 53 do 100 mm (2¼ do 4 cale), 45 kg (100 lb) lub 300 sztuk lub 2 kg (4lb)	Krótki czas trwania – wizualna ocena próbki nie trwa długo	Charakterystyki ziaren takie jak kształt, rozmiar, tekstura, kolor, skład mineralogiczny, stan fizyczny	Nie dotyczy	Zwykle zawiera mikroskopię optyczną, może zawierać analizę XRD, analizę termiczną lub spektroskopię w podczerwieni – patrz C 294 dla nomenklatury opisowej
Badanie petrograficzne stwardniałego betonu (ASTM C 856)	Określenie procedur dla badań petrograficznych betonu stwardniałego- przydatna przy określaniu stanu i zachowania się betonu	Badanie wizualne i mikroskopowe przygotowanych próbek	Przynajmniej jedna próbka odwiercona o średnicy 150 mm i 300 mm długości (6 cali średnica na 12 cali długości)	Krótki czas trwania – wraz z przygotowaniem próbek oraz badaniem wizualne i mikroskopowe	Kryształy CaOH są mniejsze niż w betonie nieuszkodzonym. Czy obrzeża lub częściowe obrzeża kryształów są bledsze w CaOH? Błady kolor obrzeży może oznaczać obecność żeluz	Patrz pomiar – to badanie określa czy zaszyły reakcje ACR i ich wpływ na beton. Należy stosować je wraz z innymi badaniami	Próbki mogą być badane pod stereomikroskopami, mikroskopami polaryzacyjnymi, mikroskopami metalograficznymi lub SEM

Powolowane w artykule normy ASTM i AASHTO

Poniżej zostały podane normy ASTM oraz równoważne im normy AASHTO, które dotyczą zjawiska reaktywności alkalia – kruszywa i które były powoływane w artykule. Zainteresowani czytelnicy mogą uzyskać dostęp do najnowszych wydań niniejszych dokumentów poprzez strony internetowe, odpowiednio www.astm.org i www.aashto.org. Należy pamiętać, że normy AASHTO mogą nie być dokładnymi replikami norm ASTM.

Nr normy ASTM/AASHTO	Tytuł normy
ASTM C 33 (AASHTO M6/M80)	Normowa specyfikacja kruszyw do betonów
ASTM C 114	Normowe metody badań do analizy chemicznej cementu hydraulicznego
ASTM C 150 (AASHTO M 85)	Normowa specyfikacja dla cementu portlandzkiego
ASTM C 227	Normowa metoda badania potencjalnej reaktywności alkalicznej mieszanek cementowo-kruszywowych (metoda badania beleczek z zapraw)
ASTM C 289	Normowa metoda badania potencjalnej reaktywności alkalia-krzemionka dla kruszyw (metoda chemiczna)

Nr normy ASTM/AASHTO	Tytuł normy
ASTM C 294	Normowe, opisowe nazewnictwo dla składników kruszyw do betonu
ASTM C 295	Normowy przewodnik do badania petrograficznego kruszyw do betonu
ASTM C 311	Normowe metody badawcze dla pobierania próbek i badań popiołów lotnych lub pucolan naturalnych do zastosowania w betonie z cementu portlandzkiego
ASTM C 441	Normowa metoda badania efektywności pucolan lub żużla wielkopieczowego do ochrony przed nadmiernymi odkształceniami betonu z powodu reakcji alkalia-krzemionka
ASTM C 586	Normowa metoda badania potencjalnej reaktywności alkalicznej skał węglanowych jako kruszyw do betonów (metoda badania walca pobranego ze skały)
ASTM C 595 (AASHTO M 240)	Normowa specyfikacja dla mieszanych cementów hydraulicznych
ASTM C 618 (AASHTO M 295)	Normowa specyfikacja dla węglowego popiołu lotnego oraz surowej i kalcytowej pucolany naturalnej dla ich zastosowania w betonie
ASTM C 856 (AASHTO T 299)	Standardowa praktyka badania petrograficznego betonu stwardniałego
ASTM C 989 (AASHTO M 302)	Granulowany żużel wielkopieczowy do zastosowania w betonie i zaprawach
ASTM C 1105	Normowa metoda badania zmian długości betonu z powodu reakcji alkalia-skały węglanowej
ASTM C 1157	Normowa specyfikacja własności cementu hydraulicznego
ASTM C 1240 (AASHTO M 307)	Normowa specyfikacja dla pyłu krzemionkowego stosowanego w mieszankach ze spoiwami
ASTM C 1260 (AASHTO T 303)	Normowa metoda badania potencjalnej reaktywności alkalicznej kruszyw (metoda badania beleczek z zapraw).
ASTM C 1293	Normowa metoda badania kruszyw do betonu poprzez określenie zmian długości (ekspansji) betonu z powodu reakcji alkalia-krzemionka
ASTM C 1567	Normowa metoda badania do określenia potencjalnej reaktywności alkalia-krzemionka mieszanek spoiw i kruszyw (przyspieszona metoda badania beleczek z zapraw)

Literatura

- [1] Farny, James A., Kerkhoff, B., "Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete", *Portland Cement Association*, Skokie, Illinois, 2007, USA
- [2] Glinicki, M., „Reakcje Alkalii-Kruszywa w Betonie i Zapobieganie”, Góralczyk, S., "Reaktywność Alkaliczna Zasobów Kruszyw w Polsce", *Materiały Konferencyjno-Szkoleniowe, Józefów marzec 2015*, IPPT PAN Warszawa
- [3] Zapaśnik, W., „Przyczyny oraz Przykłady Występowania Reakcji Alkalii-Kruszywa (AAR) w Betonie, w Świetle Doświadczeń Amerykańskich i Australijskich, część I i II”, *GDDKiA, DT-WBN, Drogownictwo Nr 8 i 9*
- [4] Stark, D., Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures, *SHRP-C/FR-91-101, Strategic Highway Research Program*, Washington, D.C., 1991a, Also PCA Publication LT165
- [5] Natesaiyer, K. and Hover, K., "Cornell's Gel Fluorescence Test Identifies ASR Products in Concrete", *Concrete Technology Today, PL922*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, July 1992
- [6] Powers, L.J., "Developments in Alkali-Silica Gel Detection", *Concrete Technology Today, PL991*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, April 1999
- [7] Touma, W.E., Fowler, D.W., and Carrasquillo, R.L., "Alkali-Silica Reaction in Portland Cement Concrete: Testing Methods and mitigation Alternatives", *Research Report ICAR 301-1F*, International Center for Aggregates Research, Austin, Texas, 2001
- [8] Thomas, M.D.A., Innis, F.A., "Use of the Accelerated Mortar Bar Test for Evaluating the Efficacy of Mineral Admixtures for Controlling Expansion due to Alkali-Silica Reaction", *Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 21, No 2., 1999*, pages 157 to 164
- [9] Mather, B., "New Concern over Alkali-Aggregate Reaction", *Joint Technical Paper by National Aggregates Association and National Ready Mixed Concrete Association, NAA, Circular No.122 and NRMCA Publication No 149*, Silver Spring, Maryland, 1975
- [10] Ozol, M.A., "Alkali Carbonate Rock Reaction", Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, *ASTM STP 169D*, edited by Lamond J.F and Pielert, J.H., *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, 2006, pages 410 to 424. Also PCA Publication LT205

Procedura recenzowania publikacji

1. Każda publikacja naukowa przesłana do Redakcji drogą elektroniczną lub pocztową podlega procedurze recenzowania.

2. Do oceny każdej publikacji wyznacza się dwóch niezależnych recenzentów spoza jednostki zatrudniającej Autora. Recenzentów wyznacza redaktor naczelny po zasięgnięciu opinii redaktorów tematycznych.

3. W przypadku wykorzystywania w publikacji zaawansowanych metod statystycznych publikację ocenia również redaktor statystyczny.

4. W przypadku tekstów powstałych w języku obcym, co najmniej jeden z recenzentów będzie afiliowany w instytucji zagranicznej innej niż narodowość autora pracy.

5. W doborze recenzentów przyjęty został model, w którym Autor i recenzenci nie znają swoich tożsamości (tzw. *double-blind review process*).

6. W szczególnych przypadkach niemożności dostosowania się do powyższej zasady (wąska problematyka artykułu, brak dużej liczby potencjalnych recenzentów) recenzent pochodzący z tej samej jednostki będzie podpisywał deklarację o niewystępowaniu konfliktu interesów – za konflikt interesów będzie się uznawać zachodzące między recenzentem a Autorem:

- bezpośrednie relacje osobiste (pokrewieństwo, związki prawne, konflikt),
- relacje podległości zawodowej,
- bezpośrednią współpracę naukową w ciągu ostatnich dwóch lat poprzedzających przygotowanie recenzji.

7. Recenzja ma formę pisemną i kończy się jednoznacznym wnioskiem, co do dopuszczenia artykułu do publikacji bez zmian, dopuszczenia artykułu do publikacji po uwzględnieniu uwag zawartych w recenzji lub jego odrzucenia.

8. Zasady kwalifikowania publikacji do druku w wyniku recenzji:
- oryginalność publikacji w zaproponowanej metodzie rozwiązania problemu, w zastosowaniu nowych ujęć teoretycznych problemu lub w przedstawieniu interesującego syntetycznego spojrzenia na pewną dziedzinę badań,
 - poprawność terminologiczna zastosowana w publikacji,
 - poprawność stylistyczna i językowa publikacji,
 - trafny i wystarczający dobór literatury,
 - właściwy dobór materiału ilustracyjnego.

9. Nazwiska recenzentów poszczególnych publikacji nie są ujawniane w kolejnych numerach czasopisma; raz w roku w numerze grudniowym lista recenzentów jest podawana do publicznej wiadomości.