Prof. dr hab. inż. MICHAŁ A. GLINICKI i zespół[1)]

Beton osłonowy w konstrukcjach narażonych na promieniowanie jonizujące

W artykule opisano podstawowe wyniki uzyskane w trakcie realizacji projektu badawczego „Trwałość i skuteczność betonowych osłon przed promieniowaniem jonizującym w obiektach energetyki jądrowej" [1]. Przedstawiono też wytyczne techniczne i kryteria oceny betonu osłonowego. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę dalszych prac przy projektowaniu obiektów elektrowni jądrowych, składowisk materiałów radioaktywnych i innych miejsc powstawania, stosowania lub przechowywania materiałów wytwarzających promieniowanie jonizujące.

Artykuł obejmuje zagadnienia związane z wymaganą skutecznością betonowych konstrukcji osłonowych przez zapewnienie bezpieczeństwa personelu i otoczenia przed oddziaływaniem promieniowania jonizującego. Rozpatrzono również trwałość osłon betonowych, tzn. zachowanie właściwości mechanicznych i nieprzepuszczalności w okresie przewidzianej eksploatacji pod wpływem przewidywanych oddziaływań zewnętrznych i procesów starzenia, a także przy podwyższonej temperaturze i promieniowaniu jonizującym. Artykuł nie obejmuje zagadnień integralności osłon pod obciążeniami wyjątkowymi, spowodowanymi awarią reaktora, uderzeniem samolotu, działaniami terrorystycznymi itp.

Charakterystyka składników betonu osłonowego

● **Właściwości kruszyw specjalnych.** Osłony betonowe stosuje się do ochrony przed szkodliwym oddziaływaniem przenikliwego promieniowania neutronowego i promieniowania γ pochodzącego z reaktorów jądrowych, akceleratorów cząstek, izotopów promieniotwórczych i radioaktywnych odpadów. Osłabianie promieniowania przez beton jest wynikiem jego interakcji z atomami pierwiastków składowych. O niezbędnej grubości osłony w określonym polu promieniowania decyduje skład chemiczny składników betonu, zwłaszcza zawartość pierwiastków ciężkich (o dużej masie atomowej), pierwiastków lekkich (głównie wodoru) oraz pierwiastków uprzywilejowanych (np. boru). Kryteria doboru zasadniczych składników betonu obejmują skład pierwiastkowy występujących minerałów, pożądany z uwagi na osłabianie określonego rodzaju promieniowania w osłonie. Zagadnienia te są bliżej omówione m.in. w monografii [2], a także w publikacjach zespołu autorskiego udostępnionych na dedykowanej stronie internetowej [3].

Kruszywa naturalne stosowane do betonu osłonowego klasyfikuje się ze względu na ich skład mineralny i wymaganą dużą gęstość. W zależności od zastosowania odróżnia się dwie kategorie kruszyw stosowanych w osłonach:

1) przed promieniowaniem γ, takie jak: hematyt, ilmenit, getyt, limonit, magnetyt, baryt;

2) przed promieniowaniem neutronowym, takie jak: kolemanit, uleksyt oraz zawierające dużą ilość wody związanej, jak serpentynit.

Podstawowa charakterystyka kruszywa obejmuje jego: gęstość objętościową, uziarnienie, zawartość pyłów, wskaźnik płaskości *FI*, nasiąkliwość, mrozoodporność. W przypadku kruszyw o określonej zawartości minerałów wpływających na osłonność wyznacza się zawartość np. $BaSO_4$ w przypadku kruszywa barytowego (co najmniej 75%), zawartość wody związanej chemicznie w przypadku kruszywa serpentynitowego (co najmniej 10%). W składzie mineralnym niedopuszczone jest występowanie składników szkodliwych, wywołujących ekspansywne reakcje w betonie. W przypadku kruszyw boronośnych sprawdza się ich kompatybilność z cementem, aby ograniczyć negatywny wpływ na czas wiązania.

W zastosowaniach osłonowych ważne są właściwości termofizyczne kruszywa, tj. współczynnik rozszerzalności cieplnej, współczynnik przewodnictwa cieplnego i ciepło właściwe; zaleca się kruszywa o możliwie małym współczynniku rozszerzalności cieplnej.

W badaniach ograniczono się do kruszyw specjalnych, dostępnych w Polsce lub w krajach ościennych. Były to: kruszywo barytowe o gęstości od 3,57 do 4,20 g/cm^3; kruszywo magnetytowe (o gęstości od 4,89 do 4,90 g/cm^3), kolemanit (gęstość 2,40 g/cm^3), uleksyt (gęstość 1,90 g/cm^3), serpentynit (gęstość od 2,58 do 2,60 g/cm^3), hematyt 0 – 4 mm (gęstość 5,00 g/cm^3) i jako porównawcze kruszywo amfibolitowe (gęstość 2,88 g/cm^3).

Koszt jednostkowy kruszyw specjalnych, ciężkich, jest większy niż polskiego kruszywa amfibolitowego lub bazaltowego około ośmiokrotnie w przypadku kruszywa magnetytowego i od 6 do 14 razy w przypadku kruszywa barytowego. Ze względu na ograniczoną dostępność w naszym kraju oraz negatywny wpływ na hydratację cementu, do szczegółowych badań wytypowano jedynie kruszywa podane w tabl. 1. Wybrane kruszywa ciężkie charakteryzowały się gęstością znacznie powyżej 3,00 g/cm^3. Zawartość $BaSO_4$ w kruszywie barytowym wynosiła 92%, a zawartość wody związanej w kruszywie serpentynitowym 11,8%. W kruszywie magnetytowym zawartość Fe_3O_4 wynosiła 90,8%. Kruszywa spełniały warunek wskaźnika płaskości $\leq FI_{50}$. Podstawowe fazy mineralne występujące w kruszywie podano w tabl. 2. Twardość kruszywa barytowego jest niewielka, zatem jego ziarna wykazują większą kruchość niż ziarna pozostałych kruszyw.

Tablica 1

Charakterystyka kruszyw specjalnych, gruba frakcja

Właściwości / Kruszywo	Gęstość, g/cm^3	Zawartość pyłów, %	Wskaźnik płaskości *FI*	Mrozoodporność, %	Nasiąkliwość, %
Barytowe	4,20	1,8	37,1	0,6	0,2
Magnetytowe	4,80	2,6	30,3	0,2	0,2
Serpentynitowe	2,60	0,9	44,5	0,8	0,6
Amfibolitowe	2,88	0,7	–	0,2	0,5

● **Właściwości cementu.** Kryteria wyboru rodzaju cementu do betonu osłonowego są następujące: masywność konstrukcji, temperatura w osłonie, wytrzymałość betonu, rodzaj promieniowania.

Kryterium dotyczące masywności konstrukcji wynika z konieczności ograniczenia szkodliwych naprężeń w betonie w początkowym okresie twardnienia, związanych z występują-

[1)] Artykuł dotyczy projektu realizowanego od 1.01.2014 r. do 31.03.2017 r. i finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Zespół autorski: prof. dr hab. inż. *Michał A. Glinicki* (kierownik projektu), prof. dr hab. inż. *Andrzej M. Brandt*, dr inż. *Mariusz Dąbrowski*, mgr inż. *Karolina Gibas*, dr inż. *Roman Jaskulski*, dr hab. inż. *Daria Jóźwiak-Niedźwiedzka* z Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, dr inż. *Tomasz Baran* i dr inż. *Albin Garbacik* z Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, dr inż. *Michał Gryziński* z Narodowego Centrum Badań Jądrowych oraz mgr inż. *Kazimierz Ładyżyński* i mgr inż. *Grzegorz Nowowiejski* z Hydrobudowy-1 Betoniarnia-Laboratorium.

Tablica 2

Skład fazowy kruszyw, metoda XRD

Rodzaj kruszywa			
Barytowe	Magnetytowe	Serpentynitowe	Amfibolitowe
Fazy w kolejności malejącej zawartości w próbce			
baryt $BaSO_4$, kwarc SiO_2	magnetyt	antygoryt żelazawy, chryzotyl, magnetyt, woda związana 11,2%	amfibole, plagioklazy, kwarc SiO_2

cym gradientem temperatury i ograniczeniem swobody odkształceń. Kryterium odnoszące się do rodzaju promieniowania dotyczy promieniowania neutronowego. W tym przypadku jest pożądany cement, w którego składzie jest możliwie najmniej zanieczyszczeń i który w wyniku twardnienia tworzy hydraty o większej zawartości wody związanej. Kryterium występowania wysokiej temperatury i potrzebnej odporności betonu dotyczy wyjątkowych elementów osłonowych, które nie są objęte wytycznymi.

Stosowanie cementów powszechnego użytku jest ograniczone podanymi wyżej kryteriami. Do wykonania konstrukcji osłonowych, z uwzględnieniem trwałości betonu, są zalecane cementy o właściwościach specjalnych: niskoalkaliczne NA, o małym cieple hydratacji LH/VLH, odporne na siarczany SR3/HSR.

Z grupy cementów powszechnego użytku i specjalnych według norm PN-EN 197-1 i PN-B-19707 przewiduje się produkcję betonów osłonowych z cementami specjalnymi:

1) portlandzkim bez dodatków mineralnych CEM I 42,5N LH/HSR/NA, o małym cieple hydratacji LH (do betonowych konstrukcji masywnych), o małej zawartości alkaliów NA, przeciwdziałający reakcji ASR (ang. Alkali Silica Reaction) i odporny na siarczany HSR, przeciwdziałający korozji siarczanowej;

2) hutniczy CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA, zawierający 55÷60% granulowanego żużla wielkopiecowego S;

3) portlandzki popiołowy CEM II/A-V 32,5R LH/HSR/NA, zawierający 15÷20% popiołu lotnego krzemionkowego V.

Cement portlandzki CEM I 42,5N LH/HSR/NA z uwagi na większą ilość wody związanej, w porównaniu z cementami CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA i CEM II/A-V 32,5R LH/HSR/NA, korzystnie wpływa na skuteczność betonowych osłon przed promieniowaniem neutronowym. Natomiast cementy CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA i CEM II/A-V 32,5R LH/HSR/NA, z dodatkiem odpowiednio granulowanego żużla wielkopiecowego S i popiołu lotnego krzemionkowego V, w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I 42,5N LH/HSR/NA, korzystnie kształtują odporność betonu na promieniowanie γ. Skład i właściwości cementów specjalnych podano w tabl. 3 i 4.

Rezultatem projektu jest także opracowanie składu i wyprodukowanie prototypowych partii dwóch nowych cementów specjalnych:

– CEM „A", belitowo-siarczanowo-glinożelazianowego, produkowanego z klinkieru specjalnego, który w procesie hydratacji tworzy związki o wyraźnie zwiększonej ilości wody związanej, w porównaniu ze zwykłym cementem portlandzkim;

– CEM „B", zawierającego do 25÷30% dodatku mączki barytowej, niestosowanej w produkcji cementów powszechnego użytku i specjalnych.

Cement A ze względu na zwiększoną ilość wody związanej korzystnie wpływa na skuteczność betonowych osłon przed promieniowaniem neutronowym, a cement specjalny B, z uwagi na dodatek mączki barytowej – na osłonność betonu wobec promieniowania γ.

Tablica 3

Skład opracowanych cementów specjalnych, udział składników, % masy

Oznaczenie cementu	Składnik			
	klinkier portlandzki	gips	granulowany żużel wielkopiecowy	popiół lotny krzemionkowy
CEM I 42,5N LH/HSR/NA	95	5	–	–
CEM II/A-S 42,5N LH/HSR/NA	76	4	20	–
CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	43	2	55	–
CEM II/A-V 42,5R HSR/NA	76	4	–	20

Tablica 4

Właściwości fizyczne cementów specjalnych

Oznaczenie cementu	Powierzchnia właściwa, cm^2/g	Gęstość, g/cm^3	Wytrzymałość na ściskanie po dniach, MPa		
			2	7	28
CEM I 42,5N LH/HSR/NA	3800	3,15	20,7	33,7	52,6
CEM II/A-S 42,5N LH/HSR/NA	3800	3,00	15,4	25,1	47,5
CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	4700	2,99	14,2	29,6	58,2
CEM II/A-V 42,5R HSR/NA	4200	2,95	30,5	41,5	52,5

Projektowanie składu betonu osłonowego

W zależności od umiejscowienia betonu w konstrukcji osłonowej wyznacza się pole promieniowania. Zastosowanie w składzie betonu materiałów o dużej skuteczności osłabiania promieniowania γ i neutronowego pozwala na zredukowanie niezbędnej grubości osłony. Projektowanie mieszanki betonowej przede wszystkim dotyczy wyboru rodzaju i zawartości kruszyw specjalnych, aby uzyskać projektowaną gęstość objętościową mieszanki i projektowaną zawartość pierwiastków osłabiających i pochłaniających promieniowanie neutronowe (wodór, bor). Po zastosowaniu kruszyw naturalnych otrzymuje się mieszanki o gęstości od 2200 do 3900 kg/m^3.

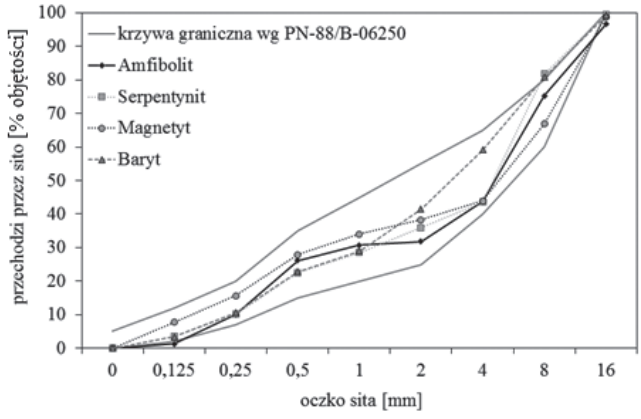
Dobór konsystencji mieszanki betonowej wynika z warunków technologicznych, tj. sposobów jej transportu i ułożenia. Należy uwzględnić gęstość rozmieszczenia zbrojenia oraz zawartość kruszyw ciężkich w stosie okruchowym. Nie zaobserwowano segregacji składników w betonach o wskaźniku $w/c < 0,5$ oraz konsystencji S2 i S3. Zaleca się konsystencję S2 w mieszankach z kruszywem ciężkim i piaskiem lub serpentynitem, aby uniknąć segregacji składników. Zgodnie z normą PN-EN 12620 należy zwrócić szczególną uwagę na unikanie segregacji mieszanki, jeśli są mieszane kruszywa różniące się gęstością.

Do ustalenia optymalnego stosu okruchowego wykorzystuje się krzywe graniczne. Aby uwzględnić różnice w gęstości poszczególnych składników mineralnych, określa się udziały objętościowe poszczególnych rodzajów i frakcji kruszyw. Ze względu na masywność konstrukcji osłonowych zaleca się stosowanie kruszywa o maksymalnej średnicy D_{max} ziaren do 16 mm. Przykłady doboru krzywych uziarnienia pokazano na rys. 1.

Zawartość cementu i stosunek wodno-cementowy w/c ustala się w odniesieniu do projektowanej wytrzymałości betonu na ściskanie i trwałości. Na ogół projektowana wytrzymałość betonu osłonowego odpowiada klasie wytrzymałości co najmniej C30/37, wymaganej w dłuższym terminie. W zależności od umiejscowienia w konstrukcji narażonej na promieniowanie, wybiera się odpowiednią kategorię agresywności środowiska. W środowisku agresji chemicznej jest zalecane stosowanie odpowiednich rodzajów cementu. Zawartość wody zarobowej powinna być ograniczona do $w/c < 0,5$, aby zmniejszyć skurcz betonu i zwiększyć odporność na wnikanie cieczy i gazów.

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie niżej wymienionych spostrzeżeń.

- Szczególną uwagę należy zwrócić na udział frakcji pylastej kruszyw ciężkich (<125 μm), która stanowi główną przyczynę podwyższonej wodożądności kruszyw i powoduje więk-



Rys. 1. Dobór krzywej przesiewu kruszyw specjalnych z piaskiem kwarcowym z dostępnych frakcji ziarnowych

sze dozowanie domieszek upłynniających. Usunięcie frakcji pylastej zwiększa możliwości optymalizacji krzywych przesiewu, urabialność betonu z kruszywami specjalnymi była zbliżona do urabialności betonu referencyjnego z kruszywem zwykłym (amfibolitowym).

- Zastosowanie kruszywa serpentynitowego znacznie zwiększa konieczną dawkę domieszki upłynniającej.
- Przy umiarkowanej zawartości cementu 350 kg/m^3 i w/c = 0,48 skurcz betonu z kruszywem specjalnym po 90 dniach, w temperaturze T = 18±2°C, wilgotności RH = 65±5% i przekroju poprzecznym badanej próbki 100 mm nie przekraczał 0,7 mm/m. Stosowanie kruszywa barytowego i serpentynitowego powoduje zwiększenie skurczu spowodowanego wysychaniem.
- Frakcja piaskowa serpentynitu wpływa na zmniejszenie wytrzymałości betonu na ściskanie o około 30%. Beton z kruszywem barytowym w dłuższych okresach dojrzewania (powyżej 28 dni) wykazuje mniejszą dynamikę zwiększania wytrzymałości w porównaniu z pozostałymi kruszywami w betonie.

Jako materiał na osłony przed promieniowaniem neutronowym i mieszanym $n+\gamma$ opracowano receptury betonu z mieszaniną kruszywa ciężkiego i kruszywa zawierającego wodę związaną. Korzystne właściwości mieszanki i betonu stwardniałego uzyskuje się w przypadku proporcji objętości kruszywa serpentynitowego do kruszywa ciężkiego 1:2 oraz gdy wraz z kruszywem ciężkim stosuje się piasek kwarcowy. Zalecane proporcje objętościowe kruszywa przy zawartości cementu 350 kg/m^3 i w/c = 0,48 są następujące:

1) 80% magnetyt + 20% piasek kwarcowy,
2) 80% baryt + 20% piasek kwarcowy,
3) 47% magnetyt + 23% serpentynit + 20% piasek kwarcowy,
4) 47% baryt + 23% serpentynit + 20% piasek kwarcowy.

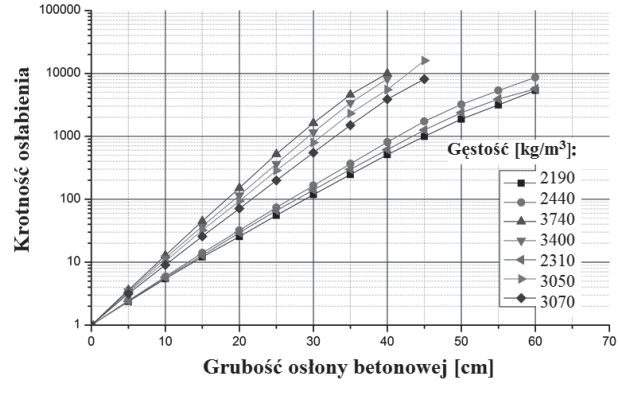
Przy zwiększaniu zawartości kruszywa serpentynitowego w stosie okruchowym obserwuje się tendencję zmniejszania wytrzymałości betonu na ściskanie o 10÷30%. Przy ekspozycji betonu osłonowego na stały kontakt z wilgocią i dostęp jonów agresywnych zaleca się stosowanie cementu CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA. W elementach konstrukcyjnych narażonych na karbonatyzację jest wskazane stosowanie cementu CEM I 42,5N LH/HSR/NA.

Wpływ składników na osłonność betonu

Ocena skuteczności osłon przed promieniowaniem jonizującym wymaga przede wszystkim określenia charakterystyki pola promieniowania, w którym osłony będą docelowo stosowane. Niezbędne jest określenie rodzaju promieniowania (gamma γ, rentgenowskie X, neutronowe n, mieszane $n+\gamma$ itp.) i widma energetycznego lub przynajmniej średniej i maksymalnej energii danego pola. Określenie wymienionych parametrów jest istotne ze względu na zróżnicowane mechanizmy oddziaływania promieniowania z materią, a także różne prawdopodobieństwo wystąpienia mechanizmu, silnie zależne od energii cząstek. Ważną charakterystyką źródła promieniowania jest określenie jego propagacji w przestrzeni, tzn. określenie, czy jest to źródło skolimowane, izotropowe, czy też rozproszone. Przy badaniu osłon przed promieniowaniem należy mieć na uwadze, że promieniowanie pierwotne w wyniku oddziaływania z materią generuje promieniowanie wtórne oraz rozproszone.

Do doświadczalnego wyznaczania wpływu składników na osłonność betonu opracowano metodykę i zbudowano stanowisko badawcze, dostosowane do płyt betonowych o wymiarach 500×500×50 mm. Stanowisko zostało skonstruowane tak, aby umieszczane kolejne płyty powodowały zwiększanie grubości osłony między źródłem promieniowania a detektorem. Źródłem promieniowania były wzorcowe izotopy promieniotwórcze oraz pole promieniowania reaktora jądrowego MARIA w NCBJ w Świerku. W przypadku reaktorowego promieniowania detekcja promieniowania za badanymi próbkami odbywała się za pomocą dwóch detektorów, z rozdzieleniem promieniowania γ od neutronowego. Pomiary w reaktorowym polu promieniowania zostały zoptymalizowane za pomocą modelowania Monte Carlo.

Badania osłonności w źródle izotopowym ^{137}Cs emitującym promieniowanie γ wykazały zwiększanie się skuteczności osłon betonowych ze zwiększaniem gęstości betonu. Najskuteczniejszą osłonność wykazał beton z magnetytem (gęstość 3740 kg/m^3), a najmniejszą beton z kruszywem serpentynitowym o gęstości 2190 kg/m^3 (rys. 2).



Rys. 2. Krotność osłabienia promieniowania γ – źródło ^{137}Cs (najmniejsza gęstość – beton z kruszywem serpentynitowym, największa gęstość – beton z kruszywem magnetytowym)

Zależność w powyższym zakresie była w przybliżeniu liniową funkcją grubości osłony. Badanie skuteczności osłon na promieniowanie neutronowe (^{239}Pu-Be) wymagało wyznaczenia składowych gamma i neutronowej w wiązce mieszanej (γ+n). W przypadku źródła neutronowego nie znaleziono zależności skuteczności badanej osłony od rodzaju stosowanych kruszyw w betonie. Można jednak wskazać receptury o lepszym wskaźniku HVL (tzw. grubość półchłonna); wśród nich w większości znajdują się betony z kruszywami serpentynitowym, magnetytowym bądź mieszanką tych kruszyw. Osłabianie promieniowania w betonach z wytypowaną proporcją kruszywa ciężkiego do serpentynitowego wynoszącą 2:1 było zdecydowanie większe niż w betonie referencyjnym z kruszywem amfibolitowym.

Wyniki pomiarów osłonności betonu przeprowadzone w źródle promieniowania reaktora MARIA są zbieżne z wynikami badania przeprowadzonego ze źródłami kalibrowanymi. Rodzaje betonu, które okazały się najskuteczniejsze w polu reaktorowym, były skuteczne również w polu ^{137}Cs oraz w polu ^{239}Pu-Be. Zaobserwowany wpływ kruszyw na osłonność betonu pozwala uszeregować mieszanki kruszyw w następującej kolejności, malejącej od największej krotności osłabiania promieniowania: baryt, magnetyt, baryt + piasek kwarcowy,

magnetyt + serpentynit (2:1), baryt + serpentynit (2:1), baryt + serpentynit (1:2), magnetyt + serpentynit (1:2), serpentynit. Osłabianie promieniowania w tym przypadku dotyczy przede wszystkim neutronów termicznych, które wywołują w betonie wtórne promieniowanie γ; dlatego o osłonności decyduje przede wszystkim gęstość betonu.

Do oceny proponowanych receptur betonu osłonowego pod względem potencjalnej aktywności składników po zakończeniu pracy reaktora jądrowego (tzn. aby nie stwarzać potencjalnych źródeł promieniowania) stosuje się neutronową analizę aktywacyjną. Z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadku mieszanek betonowych z kruszywem barytowym głównym produktem aktywacji są duże stężenia izotopów antymonu ^{122}Sb i ^{124}Sb. Izotopy te powstają w stężeniu dziesięciokrotnie przekraczającym granice bezpieczeństwa. Czas połowicznego rozpadu powyższych izotopów nie przekracza jednak 60 dni, z czego wynika, że betony z kruszywem barytowym należą do grupy betonów klasyfikowanych jako „nieaktywujące się". Obecność kruszywa magnetytowego w składzie betonu sprawia, że w strumieniu neutronów prędkich aktywują się znaczące ilości izotopów ^{54}Mn i ^{60}Co, charakteryzujących się stosunkowo długimi okresami półrozpadu, odpowiednio $T_{½}$ = 312 dni oraz $T_{½}$ = 5,3 roku. Napromienianie betonu z kruszywem magnetytowym dużymi fluencjami neutronów ($>10^{18}$ m^{-2}) skutkuje koniecznością kilkudziesięcioletniego oczekiwania na wygaszenie aktywności powyższych izotopów.

Wpływ składników na mikrostrukturę i nieprzepuszczalność betonu

● **Ocena mikrostruktury.** Ocena mikrostruktury betonu osłonowego jest niezbędna, aby wykluczyć segregację ziaren kruszywa, niejednorodność i zwiększoną porowatość matrycy cementowej. Wszelkie raki, kawerny, rozfrakcjonowanie kruszywa i miejscami podwyższona porowatość w osłonie betonowej mogą spowodować lokalne niebezpieczne przestrzały promieniowania. Ocena mikrostruktury wraz z pomiarami przepuszczalności betonu stanowi podstawę do przewidywania projektowanej trwałości betonu. Do badań mikrostruktury zastosowano techniki mikroskopowe i porozymetryczne, a także uzupełniające metody analizy termicznej i rentgenowskiej. Wyniki przeprowadzonych badań betonu pozwoliły na wyciągnięcie niżej podanych wniosków.

1) Krzywe termograwimetryczne wskazują na dużą różnicę zawartości wody z produktów hydratacji cementu w betonach z udziałem kruszywa serpentynitowego, na korzyść tego kruszywa.

2) Mikroskopowa analiza cienkich szlifów wykazała równomierną hydratację matryc cementowych, uwidoczniła jedynie pojedyncze relikty nieuwodnionych ziaren cementu, niezależnie od jego składu mineralnego.

3) Obserwacje mikroskopowe wykazały równomierne rozmieszczenie ziaren kruszywa w betonie, bez śladów segregacji, bez soczewek powietrza pod ziarnami.

4) Zaobserwowany brak dużych porów powietrznych i przypadkowo „złapanego" powietrza w próbkach betonu wskazuje na właściwie dobrany stos kruszywowy.

5) Strefa kontaktowa między kruszywem magnetytowym a matrycą cementową była zwarta, bez obszarów o podwyższonej porowatości. Strefy o zwiększonej porowatości w warstwie kontaktowej występują jedynie w betonach zawierających kruszywo serpentynitowe, a w betonie z kruszywem barytowym stwierdzono pojedyncze większe pory powietrzne.

Gęstość ziaren kruszywa i jego właściwości fizyczne wpływające na zapotrzebowanie na domieszki chemiczne, urabialność mieszanki, drgania podczas wibrowania oraz ułożenie kruszywa w elementach masywnych mają znaczący wpływ na właściwości strefy kontaktowej. Wskutek tego wpływają na przepuszczalność betonu. Dlatego z uwagi na projektowaną trwałość betonu jest preferowane stosowanie kruszyw specjalnych uzdatnionych przez przesiewanie.

● **Przepuszczalność betonu.** Przepuszczalność cieczy i gazu stanowi ważny wskaźnik trwałości betonu osłonowego narażonego na czynniki środowiskowe (wody gruntowe, atmosfera itp.) oraz eksploatacyjne (gazy i ciecze z układu chłodzenia reaktora). W zależności od agresywności środowiska ocena trwałości betonu w osłonach powinna obejmować przepuszczalność wody, roztworów jonów agresywnych, powietrza oraz dwutlenku węgla w związku z karbonatyzacją betonu w otulinie zbrojenia. Proponuje się wykorzystanie następujących metod badawczych do wyznaczania wskaźników przepuszczalności: współczynnik absorpcji wody ASTM C 1585, współczynnik migracji jonów chlorkowych NT BUILD 492, przepuszczalność powietrza – urządzenie Autoclam oraz głębokość karbonatyzacji według PN-EN 13295.

Wpływ składników na przepuszczalność betonu wynika przede wszystkim z przepuszczalności matrycy cementowej, kształtowanej przez właściwości cementu, i stosunku *w*/*c*. W dalszej kolejności wynika z rodzaju zastosowanych kruszyw specjalnych, następnie ich kształtu oraz obecności pyłów, które wpływają na przepuszczalność warstwy kontaktowej. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono następujące efekty zróżnicowania składników betonu:

1) głębokość wnikania dwutlenku węgla:

– głębokość po 360 dniach ekspozycji w 1% CO_2: od 1,5 do 34 mm,

– najmniejszą głębokość karbonatyzacji wykazywał beton z cementem portlandzkim CEM I 42,5N LH/HSR/NA i dalej w kolejności rosnącej: CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA, CEM „B", CEM „A",

– wykonanie betonu osłonowego w skali przemysłowej nie wpływa w sposób istotny na głębokość karbonatyzacji;

2) przepuszczalność powietrza:

– współczynnik API przy RH = 55÷65%: od 0,089 do 0,300 ln (mbar/min),

– rodzaj cementu: przepuszczalność mniejsza przy CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA niż w przypadku CEM I 42,5N LH/HSR/NA,

– w skali przemysłowej w blokach masywnych przepuszczalność betonu większa przy CEM I 52,5R niż w przypadku CEM II/B-V i CEM II/B-S;

3) współczynnik szybkości absorpcji wody:

– współczynnik początkowej szybkości absorpcji: od 2 do $252 \cdot 10^{-4}$ mm/s$^{1/2}$,

– najmniejszy współczynnik wykazywał beton z cementem CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA i dalej w kolejności rosnącej przepuszczalności: CEM II/B-V 42,5N, CEM I 42,5N LH/HSR/NA, CEM „B" (30% mączki barytowej), CEM „A" (belitowo-siarczanowo-glinożelazianowy),

– wpływ kruszywa w kolejności rosnącej przepuszczalności: magnetyt, baryt, magnetyt + serpentynit zbliżony do baryt + serpentynit, serpentynit (2–16 mm),

– segregacja mieszanki z kruszywem magnetytowym przy *w*/*c* > 0,6 w skali przemysłowej powoduje kilkukrotne zwiększenie współczynnika szybkości absorpcji wody;

4) współczynnik migracji jonów chlorkowych:

– współczynnik: od $3 \cdot 10^{-12}$ m^2/s do $38 \cdot 10^{-12}$ m^2/s,

– najmniejszy współczynnik wykazywał beton z cementem CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA i dalej w kolejności rosnącej: CEM II/B-V 42,5N, CEM I 42,5N LH/HSR/NA, CEM „B", CEM „A",

– wpływ kruszywa wynikał z uziarnienia i rodzaju użytego kruszywa, w kolejności rosnącej: baryt, magnetyt frakcja 0–16 mm, magnetyt 0–5,6 mm, serpentynit 2–16 mm, serpentynit 0–2 mm,

– wykonanie betonu osłonowego w skali przemysłowej powoduje zwiększenie współczynnika migracji jonów chlorkowych od kilku procent do przejścia do kategorii gorszej klasy odporności.

Pod względem przepuszczalności jonów chlorkowych i szybkości absorpcji wody korzystniejsze jest stosowanie cementu z grupy cementów hutniczych CEM III/A lub ewentualnie innych z dodatkami mineralnymi niż cementu CEM I. Jednocześnie zastosowanie cementu hutniczego powoduje zwiększenie głębokości karbonatyzacji. Najmniejszą przydatność do betonów osłonowych o małej przepuszczalności stwierdzono w przypadku eksperymentalnego cementu belitowo-siarczanowo-glinożelazianowego oznaczonego CEM „A", przydatnego raczej w środowisku suchym i podwyższonej temperatury.

Zawartość frakcji pylastych i proporcje kruszyw specjalnych w stosie okruchowym silnie wpływają na przepuszczalność betonu osłonowego. Beton z kruszywem ciężkim i zwiększającą się zawartością kruszywa serpentynitowego wykazuje różną przepuszczalność w zależności od rodzaju użytego kruszywa ciężkiego. Zwiększeniu zawartości kruszywa serpentynitowego w betonie z kruszywem magnetytowym nie towarzyszy znaczące zwiększenie przepuszczalności. W analogicznym przypadku betonu z kruszywem barytowym jest widoczne wyraźne zwiększenie przepuszczalności o 30% przy zwiększeniu zawartości serpentynitu z 23 do 47%. Najlepsze wskaźniki nieprzepuszczalności betonu z kruszywem mieszanym uzyskano przy proporcji 2:1 objętości kruszywa ciężkiego do kruszywa serpentynitowego. Nieprzepuszczalność betonu z magnetytem jedynie nieznacznie ustępuje nieprzepuszczalności betonu z kruszywem referencyjnym amfibolitowym.

Wpływ składników na właściwości termofizyczne betonu

Wpływ składników na właściwości termofizyczne betonu osłonowego jest bardzo istotny i dotyczy zarówno stosowanych kruszyw, jak też rodzaju cementu. Właściwości termofizyczne, kluczowe z uwagi na zastosowanie do budowy konstrukcji osłonowych, obejmują: współczynnik przewodnictwa cieplnego, ciepło właściwe i współczynnik rozszerzalności cieplnej betonu. W przypadku masywnych konstrukcji osłonowych jest istotna szybkość i całkowite wydzielone ciepło hydratacji oraz zmienność wymienionych wyżej właściwości termofizycznych w okresie początkowego twardnienia betonu. Przy znacznych wymiarach przekroju elementu konstrukcyjnego należy podjąć odpowiednie środki zapobiegawcze, aby nie powstały zbyt duże różnice temperatury, powodujące spękania termiczne. Przy projektowaniu składu betonu trzeba kierować się m.in. następującymi obserwacjami:

– małe ciepło właściwe betonu oznacza, że w betonie nastąpi wyższy przyrost temperatury z powodu wydzielonego ciepła hydratacji, nawet w przypadku tego samego rodzaju i zawartości cementu;

– mała przewodność cieplna betonu spowoduje, że rdzeń masywnej konstrukcji betonowej będzie się dłużej ochładzał;

– wybór minerałów skalnych o dużym współczynniku rozszerzalności cieplnej spowoduje zwiększenie odkształceń termicznych betonu i w konsekwencji może pojawić się bardziej intensywne powstawanie rys.

Zaobserwowano następujący wpływ kruszyw specjalnych na właściwości cieplne betonu:

1) współczynnik przewodności cieplnej betonu:

– w stanie nasyconym wodą: od 1,52 do 3,13 W/(m·K),

– w stanie wysuszonym: od 1,12 do 2,51 W/(m·K),

– wpływ kruszywa w kolejności rosnącej: baryt, baryt + serpentynit, serpentynit, magnetyt + serpentynit, magnetyt;

2) współczynnik rozszerzalności cieplnej betonu jest zmienny od 8 do $19 \cdot 10^{-6}$ 1/°C, a w stanie powietrzno-suchym większy niż w stanie nasyconym wodą lub suchym zależy także od rodzaju kruszywa: serpentynit, magnetyt, amfibolit – poniżej $11 \cdot 10^{-6}$ 1/°C, a baryt + serpentynit i baryt – powyżej $11 \cdot 10^{-6}$ 1/°C.

Szybkość i całkowite ciepło hydratacji (twardnienia) spoiwa zależą przede wszystkim od składu mineralnego i uziarnienia cementu. Do zastosowań w masywnych konstrukcjach osłonowych wybiera się cement o odpowiednio małym cieple hydratacji. W tablicy 5 podano moc cieplną hydratacji i ciepło uwodnienia w ciągu pierwszych 3 dni twardnienia cementów z grupy cementów specjalnych opracowanych w ramach Projektu.

Tablica 5

Ciepło hydratacji cementów

Cement	Maksymalna temperatura zaprawy, °C	Maksymalna moc cieplna, J/g·h	Ciepło hydratacji po czasie, h					
			12	24	36	41	48	72
			J/g					
CEM I 42,5N LH/HSR/NA	39,5	12,5	65	182	218	227	237	261
CEM II/A-S 42,5N LH/HSR/NA	37,0	10,2	63	162	194	200	206	219
CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	37,2	8,4	81	173	216	227	239	265
CEM II/A-V 42,5R HSR/NA	45,9	27,1	185	270	298	305	313	331

Zmienność właściwości termofizycznych betonu w początkowym okresie dojrzewania, wyznaczona metodą doświadczalno-obliczeniową w rezultacie rozwiązania odwrotnego zadania przepływu ciepła, istotnie zależy od rodzaju cementu i rodzaju kruszywa. Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła zmieniał się w granicach od 3,16 do 3,70 W/(m·K) w przypadku betonu z kruszywem magnetytowym, a w granicach od 1,62 do 2,76 W/(m·K) w przypadku betonu z innymi badanymi kruszywami. Efektywne ciepło właściwe zmieniało się w granicach od 550 do 1100 J/(kg·K). Skutki zróżnicowania termofizycznych właściwości betonów są znaczące w kontekście zagrożenia wystąpieniem wczesnych spękań termicznych. Maksymalny przyrost temperatury podczas twardnienia mieszanek z cementami z grupy LH był niewielki i niezależny od rodzaju kruszywa. Największą maksymalną szybkość wewnętrznego ocieplania betonu stwierdzono w przypadku CEM I 52,5R i kruszywa magnetytowego, CEM I 42,5R z kruszywem magnetytowym oraz CEM I 42,5R z amfibolitem lub serpentynitem. Zastosowanie cementu typu LH, przy umiarkowanej jego zawartości w betonie, wywołuje około dwukrotnie mniejszą szybkość zwiększania temperatury.

Maksymalne zróżnicowanie temperatury w twardniejącym elemencie betonowym, określone tzw. gradientem temperatury, było największe w przypadku cementu CEM I 42,5R oraz kruszywa serpentynitowego. Ponad dwukrotnie mniejszy gradient temperatury zaobserwowano w przypadku stosowania cementów z grupy LH z kruszywem magnetytowym i amfibolitowym. Pośrednie gradienty temperatury stwierdzono w przypadku zastosowania cementów powszechnego użytku z grupy CEM II/B-V i B-S. Wśród kruszyw specjalnych kruszywa barytowe powodują zwiększenie gradientu temperatury. Odnosząc się do granicznej, dopuszczalnej na ogół różnicy temperatury w betonie od 15 do 20°C, okazuje się, że cementy z grupy LH wykazują pożądaną skuteczność zapobiegania powstawaniu nadmiernych gradientów temperatury.

Wybór receptury betonu osłonowego, odpowiedniej do zastosowania w konstrukcji masywnej, wymaga przeprowadzenia przestrzennej analizy rozkładu temperatury w twardniejącym betonie.

Zapobieganie szkodliwej reakcji alkalicznej kruszyw

Przy selekcji składników do wytworzenia betonu osłonowego należy zapobiegać powstawaniu uszkodzeń wskutek reakcji alkalia–kruszywo (AAR). Reakcja ta może prowadzić do wystąpienia znacznych uszkodzeń, niedopuszczalnych w konstrukcjach osłonowych. Strategia zapobiegania AAR opiera się na wytycznych normy ASTM C1778 oraz zaleceniach RILEM.

Do rozpoznania reaktywności kruszyw i oceny ekspansji betonu wskutek reakcji alkalia-kruszywo wykorzystuje się niżej wymienione metody (lub odpowiedniki RILEM):

a) ocena petrograficzna według ASTM C295, ASTM C856; metoda ta polega na zidentyfikowaniu reaktywnych form krzemionki;

b) pomiar ekspansji próbek zapraw metodą przyspieszoną w temperaturze 80°C według ASTM C1260; kryterium niereaktywności odpowiada wydłużeniu <0,1% po 14 lub 28 dniach;

c) pomiar ekspansji próbek betonu metodą długotrwałą w temperaturze 38°C według ASTM C1293; kryterium niereaktywności odpowiada wydłużeniu <0,04% po roku lub 2 latach.

Badania doświadczalne kruszyw do betonu osłonowego objęły 10 kruszyw o dużej gęstości (barytowe, magnetytowe, hematytowe) oraz kruszywo serpentynitowe. Zastosowano trzy rodzaje cementu portlandzkiego CEM I 42,5R o różnej zawartości alkaliów Na_2O_{eq}.

Analiza petrograficzna na cienkich szlifach wykazała, że kruszywa barytowe różnią się składem mineralnym w zależności od miejsca pochodzenia. W jednym z kruszyw barytowych rozpoznano występowanie krystobalitu, minerału należącego do gromady krzemianów, będącego reaktywnym składnikiem kruszywa. Kruszywa, które zawierają krystobalit, wykazują szczególną podatność na reakcję alkalia–krzemionka. W kruszywie hematytowym stwierdzono obecność mikro- i drobnokrystalicznego kwarcu (rys. 3). Zawartość 0,08% wysokoreaktywnego kwarcu (kryształy <10 μm) oraz 2,67% reaktywnego kwarcu (kryształy 10÷60 μm) – wskazuje na zagrożenie wystąpieniem ASR. W kruszywie magnetytowym nie stwierdzono występowania reaktywnych form kwarcu.

Badania ekspansji według ASTM C1260 zaprawy z kruszywem hematytowym wykazały największy przyrost długości. Już po 7 dniach badania wydłużenie beleczek przekroczyło wartość graniczną 0,2%. Ekspansja próbek po 14 dniach wynosząca około 0,30÷0,35% klasyfikuje to kruszywo jako bardzo reaktywne. Najmniejszą ekspansję wykazały zaprawy z kruszywem magnetytowym – około 0,02% po 14 dniach. Ekspansja beleczek z badanych kruszyw zwiększała się wraz ze zwiększeniem zawartości alkaliów w cemencie. W zaprawach z kruszywem hematytowym zaobserwowano spękania ziaren i matrycy cementowej oraz charakterystyczny żel krzemionkowo-alkaliczny wypełniający pory. Produkty reakcji ASR zaobserwowano także w zaprawie z kruszywem barytowym, zawierającym krystobalit.

Na podstawie badań długotrwałych stwierdzono niewielkie zwiększenie długości belek betonowych z kruszywem barytowym, magnetytowym, serpentynitowym i amfibolitowym, (poniżej granicy 0,04% po okresie 1 roku). Najmniejszą ekspansję wykazał beton z kruszywem barytowym (0,025%), dalej serpentynitowy (0,028%) i magnetytowy (0,033%).

Na podstawie przeprowadzonych badań, kierując się kryteriami oceny:

a) składu mineralogicznego kruszyw odnośnie do ich potencjalnej reaktywności i zawartości reaktywnych form krzemionki,

b) wyników badań ekspansji zapraw i betonów,

wytypowano następujące kombinacje kruszyw jako zalecane z uwagi na zabezpieczenie przed uszkodzeniami wskutek AAR:

– kruszywa ciężkie: magnetytowe o gęstości 4,80 g/cm^3 oraz barytowe o gęstości 4,20 g/cm^3,

– kruszywo o dużej zawartości wody związanej: serpentynitowe o gęstości 2,60 g/cm^3.

Najmniejszą ekspansję wykazały próbki wykonane z cementu z najmniejszą zawartością alkaliów.

Trwałość betonu w warunkach ekspozycji na promieniowanie

Ogólne wymagania trwałościowe podane w normach PN-EN 206 oraz PN-EN 1990 należy traktować jako minimalne, które się weryfikuje i uzupełnia na podstawie analizy skutków specyficznych oddziaływań na osłony radiologiczne.

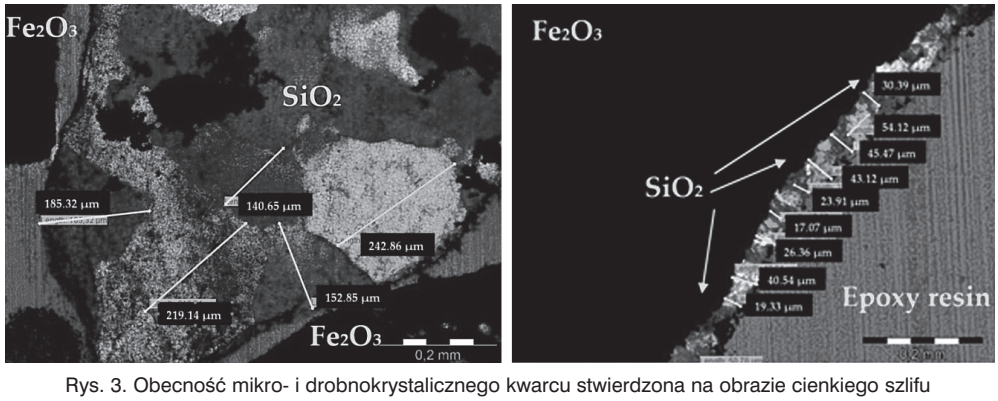
Projektowany okres eksploatacji elektrowni jądrowych wynosi co najmniej 30–40 lat, a przewiduje się jego przedłużanie do 60–80 lat. Okres funkcjonalności konstrukcji osłonowych obejmuje też dodatkowy czas niezbędny do rozbiórki obiektu po zakończeniu eksploatacji i usunięcia odpadów niebezpiecznych. Ten czas może wynosić do 40 lat. Według PN-EN 1990 konstrukcje osłon radiologicznych należą do najwyższej klasy konsekwencji CC3, tj. do grupy konstrukcji o wysokim zagrożeniu życia ludzkiego i bardzo dużych konsekwencjach ekonomicznych, społecznych i środowiskowych. Przy projektowaniu konstrukcji osłonowych należy przeanalizować długotrwałe oddziaływania środowiskowe w skojarzeniu z oddziaływaniem promieniowania i temperatury występujących w otoczeniu źródeł promieniowania. Przy normalnej eksploatacji reaktora jądrowego w elektrowni w osłonie betonowej występuje temperatura podwyższona do 65°C, a jedynie miejscowo może wystąpić temperatura do 95°C. W okresie eksploatacji reaktora lekkowodnego do 80 lat graniczna dawka promieniowania γ wynosi 10^8 Gy, a graniczna fluencja neutronów – od 10^{19} do 10^{20} n/cm^2. W zależności od rodzaju konstrukcji reaktora i osłony, temperatura graniczna, jak też graniczne strumienie neutronów i dawki promieniowania γ mogą być inne.

Zgodnie z zasadami normowymi o trwałości konstrukcji świadczy jej nośność i przydatność użytkowa, rozpatrywana w projektowanym okresie eksploatacji. Przydatność użytkową określa się na podstawie spełnienia wymagań wytrzymałości betonu oraz ograniczeń na obciążenia użytkowe wynikających m.in. z dopuszczalnej szerokości rys, dopuszczalnych ugięć, dopuszczalnych naprężeń w elementach sprężonych. Kryteria oceny betonów osłonowych w zależności od ich umiejscowienia w konstrukcji w specyficznych warunkach oddziaływań dotyczą jego właściwości związanych z funkcjonalnością użytkową osłon, spełniających wymagania: a) nośności konstrukcyjnej, b) osłonności przed przenikaniem promieniowania jonizującego, c) osłonności przed przenikaniem cieczy i gazów, tj. nieprzepuszczalności osłony.

Skład zaprojektowanego betonu osłonowego należy ocenić pod względem wytrzymałości, osłonności i przepuszczalności, wraz z oceną mikrostruktury.

Niezbędną odporność betonu na przenikanie mediów ciekłych i gazowych proponuje się oceniać według wskaźników przepuszczalności podanych w tabl. 6. Kryteria zaproponowane przez autorów zostały zweryfikowane w próbach w skali przemysłowej.

W przypadku osłon radiologicznych przyjmuje się wysoki poziom prewencji (wykluczenie) występowania szkodliwych zja-



Rys. 3. Obecność mikro- i drobnokrystalicznego kwarcu stwierdzona na obrazie cienkiego szlifu

Tablica 6

Kryteria oceny przepuszczalności betonu osłonowego

Wskaźnik przepuszczalności	Metoda oznaczenia	Proponowane kryterium
Współczynnik absorpcji powierzchniowej wody, 10^{-4} mm/s$^{1/2}$	ASTM C1585	< 20
Współczynnik przepuszczalności powietrza API, ln(mbar)/min	Autoclam przy RH = 65%	< 0,3
Głębokość karbonatyzacji po roku w 1% CO_2, mm	PN-EN 12390-12 PN-EN 14630	< 20
Współczynnik migracji jonów chlorkowych, 10^{-12} m$^2 \cdot$s^{-1}*)	NT Build 492	< 10
*) Metoda niewskazana w przypadku kruszyw o dużej przewodności elektrycznej.		

wisk ekspansji betonu. Dotyczy to omówionego już zjawiska ASR oraz wewnętrznej destrukcji siarczanowej (DEF, powstawanie opóźnionego ettringitu). Podstawowym sposobem zapobiegania DEF jest ograniczenie temperatury twardniejącego betonu do 65°C.

Długotrwałe oddziaływanie promieniowania neutronowego i γ na beton może spowodować zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i na rozciąganie po przekroczeniu granicznej fluencji lub dawki. Długotrwałe napromienienie może powodować pęcznienie ziaren kruszywa w betonie oraz skurcz stwardniałego zaczynu cementowego. Może też wywołać amorfizację ziaren kruszywa krzemionkowego i zwiększyć podatność na wystąpienie reakcji alkalia-kruszywo. Wycinkowe badania przeprowadzone w ramach projektu wykazały tendencję do zmniejszenia wytrzymałości betonu wskutek napromienienia, ale efekty nie były znaczące.

Wskazówki technologiczne

● **Produkcja i wbudowanie mieszanki betonowej.** Zmienność właściwości kruszyw specjalnych (gęstości i składu mineralnego) w zależności od miejsca wydobycia jest większa niż zwykłych kruszyw naturalnych. Przed użyciem kruszywa barytowego należy sprawdzić zawartość siarczanu baru ($BaSO_4$). Na rynku są dostawcy oferujący kruszywo barytowe o zbyt małej, niezgodnej z normą zawartości siarczanu baru. Dostępny jest też baryt frakcji 0–16 mm o odpowiednio dużej zawartości $BaSO_4$.

Przy produkcji mieszanki betonowej należy wziąć pod uwagę niżej podane spostrzeżenia.

1) Przy zastosowaniu kruszywa magnetytowego można uzyskać mieszankę betonową o gęstości około 3700 kg/m^3.

2) Mieszanki betonowe z kruszywem serpentynitowym wykazują pogorszoną konsystencję – należy stosować dużą ilość domieszki upłynniającej. Należy brać to pod uwagę w przypadku transportu i wbudowywania mieszanki w deskowania; możliwy jest transport wywrotkami.

3) Produkcja i transport mieszanki betonowej o dużej gęstości objętościowej (z kruszywem magnetytowym lub barytowym) jest możliwa przy użyciu konwencjonalnych mieszarek i betonowozów. Należy zwrócić szczególną uwagę na:

– nieprzekraczanie dopuszczalnej ładowności urządzeń w węźle betoniarskim,

– zmniejszoną objętość załadunkową betonowozu.

4) Ze względu na gorszą urabialność należy stosować kruszywo serpentynitowe wraz z innymi kruszywami, szczególnie ograniczając stosowanie serpentynitu frakcji 0–2 mm.

5) W żadnej mieszance betonowej z kruszywami specjalnymi nie zauważono rozsegregowania kruszyw.

6) Spostrzeżenia technologiczne dotyczące urabialności mieszanki betonowej:

– kruszywa ciężkie pogarszają urabialność w porównaniu z kruszywami normalnej gęstości;

– urabialność jest gorsza, jeżeli ziarna kruszywa są płaskie, wydłużone;

– lepszą urabialność wykazują mieszanki z kruszyw jednorodnych;

– jednorodność mieszanki łatwiej osiągnąć, gdy urabialność mieszanki jest dobra – mieszanka daje się dobrze ułożyć i zagęścić. W tym celu należy stosować domieszki redukujące zawartość wody, tj. plastyfikatory i superplastyfikatory.

● **Uwagi technologiczne do wykonywania osłon betonowych.** W celu zapewnienia trwałości trzeba przyjąć szczególne wymagania w stosunku do zastosowanego betonu w osłonach, obejmujące następujące zagadnienia:

– minimalizacja rys i przesiąkania przez beton dzięki kontrolowaniu temperatury młodego betonu podczas hydratacji;

– minimalizacja skurczu betonu;

– niedopuszczenie do niebezpiecznej reakcji alkalicznej kruszywa;

– zapewnienie małej przepuszczalności cieczy i gazów;

– zapewnienie odporności na cykle zamrażania i odmrażania w tych elementach, które są narażone na działanie mrozu.

Warunek trwałości w okresie 100 lat musi być spełniony.

Badania laboratoryjne i polowe powinny poprzedzać wykonanie betonu na konstrukcje osłonowe. Trzeba zapewnić właściwy rozwój wytrzymałości w czasie dojrzewania betonu, aby uniknąć zbyt wysokiej temperatury i gradientów temperatury.

Z uwagi na zmienność w stosunkowo szerokim zakresie zawartości składników w kruszywach mineralnych, stosowanych w betonie osłonowym, jest konieczne wykonanie próbnych mieszanek w warunkach odpowiadających zastosowaniu w skali rzeczywistej.

Przy projektowaniu i wykonywaniu betonu osłonowego jest konieczne wdrożenie skutecznego systemu kontrolowania jakości kruszyw i gotowego betonu, co omówiono w wytycznych [1].

Wnioski końcowe

1. Na podstawie badania próbek betonowych, wykonanych w laboratorium i w skali przemysłowej w zakresie przewidzianym w omówionym projekcie stwierdzono możliwość wykonywania w Polsce betonu osłonowego o właściwościach i trwałości odpowiadających obowiązującym kryteriom.

2. Podane wskazania co do składu i technologii powinny być sprawdzone w skali polowej z wykorzystaniem kruszyw, cementów i domieszek takich, jakie są przewidziane do użycia w produkcji betonu osłonowego.

3. Beton osłonowy powinien mieć wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach co najmniej 60 MPa ze względu na konieczność odpowiedniej wytrzymałości na rozciąganie. Nie należy projektować betonu o nadmiernie wysokiej wytrzymałości ze względu na możliwość pogorszenia innych właściwości.

4. Właściwości wszystkich składników, a zwłaszcza kruszyw specjalnych, powinny być systematycznie kontrolowane, aby zachować wymaganą jakość betonu w osłonach.

5. Odporność betonu na agresję chemiczną w warunkach oddziaływania środowisk siarczanowych i chlorkowych w pobliżu zbiorników wodnych powinna być sprawdzona przez wykonanie badań laboratoryjnych i polowych w celu zastosowania odpowiednich zabezpieczeń.

6. Użycie kruszyw specjalnych, w szczególności magnetytowych i barytowych, wymaga stosowania starannie opracowanej technologii, aby zapewnić prawidłową jednorodność betonu.

PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

[1] *Glinicki M.A.*, *Brandt A.M.*, *Dąbrowski M.*, *Gibas K.*, *Jóźwiak-Niedźwiedzka D.*, *Baran T.*, *Garbacik A.*, *Gryziński M.*, *Ładyżyński K.*, *Nowowiejski G.*: Wytyczne techniczne i kryteria oceny betonów osłonowych w zależności od ich umiejscowienia w konstrukcji narażonej na promieniowanie jonizujące. IPPT PAN, Warszawa 2017.

[2] *Ablewicz Z.*, *Jóźwik B.*: Budownictwo w technice jądrowej. Arkady, Warszawa 1978.

[3] http://atomshield.ippt.pan.pl/?page_id=84 (data dostępu 6.07.2017).