

Beton jako materiał osłon w budownictwie związanym z energetyką jądrową

CONCRETE AS A SHIELDING MATERIAL
IN NUCLEAR ENERGY CONSTRUCTIONS

Streszczenie

Beton jest głównym materiałem stosowanym do budowy osłon przed promieniowaniem ze względu na stosunkowo niski koszt oraz możliwość spełniania także funkcji konstrukcyjnych. Betony osłonowe muszą być komponowane i wykonywane w sposób szczególny, aby spełniały wszystkie wymagania, nie tylko skutecznego osłabiania różnorodnego promieniowania, ale także trwałości. W referacie przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z projektowaniem betonów osłonowych na tle obecnego stanu wiedzy. Aktualna znajomość tego tematu inżynierii materiałowej jest potrzebna przed przystąpieniem do budowy przemysłowych reaktorów atomowych w Polsce, niezależnie od sposobu realizacji takiej inwestycji.

Abstract

Concrete is a basic material for protection shields against radiation because of its relatively low cost and ability to perform structural functions. Concretes for shields have to be composed and executed especially for purpose in order to satisfy various requirements, related not only to attenuation of different forms of radiation but also for expected durability. In the paper main problems connected to designing such concretes and their execution are described on the basis of the present state of knowledge. In view of future investments in nuclear energy in Poland, it is necessary to upgrade our level of information in this part of material engineering; this seems to be independent on the way in which these projects will be realized.

1. Wprowadzenie

Beton różnego rodzaju jest powszechnie stosowany w budownictwie związanym z wytwarzaniem energii w reaktorach atomowych. Można odróżnić cztery zakresy zastosowania betonu w budownictwie związanym z elektrowniami atomowymi: obudowa pierwotna, obudowa wewnętrznej konstrukcji, obudowa drugorzędna (budynek), wreszcie inne konstrukcje pomocnicze, Naus (2009). Konstrukcje betonowe są więc używane do obudowy urządzeń pracujących w kolejnych strefach bezpieczeństwa, otaczających rdzeń reaktora, a także w budynku, w którym znajduje się reaktor. Elementy betonowe osłaniają personel od promieniowania w tych strefach, a także stanowią ochronę przed oddziaływaniami zewnętrznymi: klimatycznymi, atakiem terrorystycznym, uderzeniem spadającego samolotu, itd. Ważne jest także zastosowanie betonu w magazynach materiałów rozszczepialnych i przy zestalaniu odpadów, a także w osłonach izotopów radioaktywnych w ośrodkach medycznych. Z tych powodów, wielostronne zainteresowanie betonem jako materiałem osłonowym jest uzasadnione.

Prace badawcze nad zastosowaniem betonu w budowie obiektów związanych z wytwarzaniem energii jądrowej były rozpoczęte w Polsce jeszcze przed 1970 rokiem, a później rozwijane w związku z zamierzoną budową reaktora w Żarnowcu, lecz od szeregu lat są prowadzone mniej intensywnie. Natomiast w wielu krajach nadal realizowane są wielokierunkowe badania związane z przydatnością betonu do osłon przed promieniowaniem wobec eksploatacji reaktorów jądrowych kolejnych generacji i rozszerzania wszystkich innych zastosowań materiałów promieniotwórczych. Tematyka ta nabiera szczególnej ważności wobec przyjęcia przez rząd Polski w 2010 r. programu rozwoju energetyki jądrowej*, ale jest stale aktualna wobec funkcjonowania doświadczalnego reaktora jądrowego „Maria” w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku, w którym wytwarzana są materiały radioaktywne, stosowane dla potrzeb badawczych, przemysłowych i leczniczych, a także prowadzone są prace badawcze i szkoleniowe. Odpady radioaktywne są gromadzone na składowisku pod Różanem.

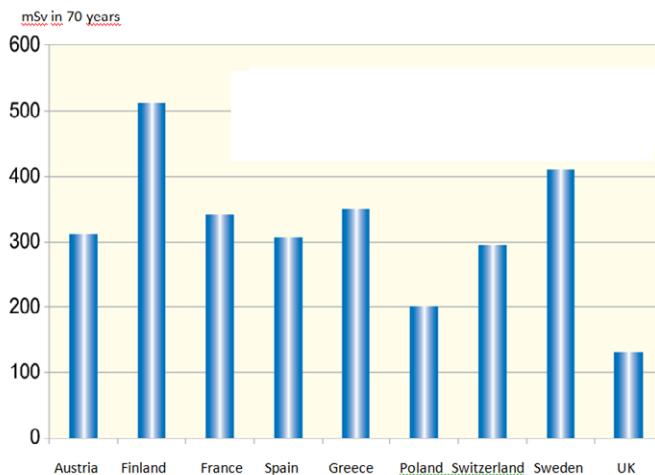
Referat zawiera krótki przegląd współczesnego stanu wiedzy na temat wykorzystania betonu w budownictwie związanym z energetyką jądrową i wykorzystaniem materiałów rozszczepialnych. Przedstawione wyniki i wnioski są ograniczone do oddziaływań na beton podczas normalnej eksploatacji urządzeń i materiałów rozszczepialnych i nie dotyczy sytuacji awaryjnych, np. stopienia rdzenia reaktora na skutek wyłączenia chłodzenia**, które może wywołać m.in. oddziaływanie płynnego metalu na beton. Prawdopodobieństwo takiego zdarzenia w ciągu roku oceniono na $1,8 \cdot 10^{-6}$, co odpowiada jednemu zdarzeniu w okresie ponad 1300 lat przy liczbie reaktorów czynnych na świecie w 2009 r. Obliczenia tego rodzaju oparte są na szeregu trudnych do sprawdzenia założeniach i nie są tu analizowane.

2. Promieniowanie i jego wpływ na organizm człowieka

Promieniowanie występuje wszędzie na ziemi. Jest to promieniowanie naturalne, które pochodzi z przestrzeni kosmicznej oraz z materiałów promieniotwórczych w gruncie i w skałach. Substancje promieniotwórcze są więc także w elementach budynków, jak

* Ministerstwo Gospodarki „Program Polskiej Energetyki Jądrowej”, projekt 2010 r.

** por. Sevón T. (2005) Molten core – concrete interactions in nuclear accidents. VTT Res.Notes 2311, MSc Thesis, 88 str.



Rys. 1. Średnie wartości promieniowania ziemskiego w ciągu 70 lat życia w kilku krajach europejskich, według IAEA

również w pożywieniu. Również ciało człowieka zawiera elementy promieniotwórcze, a dodatkowe dawki promieniowania otrzymujemy podczas różnych badań medycznych i kuracji.

Ilości promieniowania przyjmowane w okresie 70. lat życia człowieka są różne w różnych krajach, a przybliżone wartości odpowiadające mieszkańcom kilku krajów pokazane są na rys. 1. Takie ilości są traktowane jako poziomy porównawcze w stosunku do ewentualnych innych przyczyn napromieniowania. W Polsce człowiek w ciągu 70 lat życia przyjmuje średnio 0,2 Sv, przy czym najwięcej w Zakopanym, a najmniej we Wrocławiu.

Nie wchodząc w szczegóły opisu procesów, które powodować mogą napromienianie człowieka okazuje się, że niebezpieczne dawki mogą powstawać w przypadku mniejszych lub większych awarii w zakładach energetycznych opartych na reakcjach jądrowych, w miejscach stosowania izotopów radioaktywnych oraz w składowiskach odpadów radioaktywnych. Są to miejsca, w których ludzie muszą być chronieni przed skutkami napromieniowania, ponieważ strumienie neutronów i jonizacja mogą w sposób zasadniczy uszkodzić organizm człowieka.

Procesy zachodzące w materiałach rozszczepialnych, podczas produkcji energii, w składowiskach, a także przy zabiegach medycznych, powodują powstawanie:

- promieniowania alfa (α) i beta (β) w postaci strumieni cząstek;
- promieniowania gamma (γ), zbliżonego do elektromagnetycznych promieni Roentgena (X), fal świetlnych i radiowych;
- strumieni neutronów o różnych energiach.

Promieniowanie α jest strumieniem jąder helu, o zasięgu 25 do 120 mm. Cząstki te tracą energię przechodząc przez powietrze czy innych ośrodki. Promieniowanie β jest strumieniem elektronów, który ma zasięg kilku metrów, przenika na głębokość około 10 mm w tkankę biologiczną. Promieniowanie α może być zatrzymane przez arkusz papieru, promieniowanie β przez kilka milimetrów aluminium lub pleksi/szkła organicznego.

Promieniowanie w postaci fotonów γ ma naturę fal elektromagnetycznych i największą energię, przy długości fali poniżej jednej dziesiątej nanometra; może przenikać przez ciało ludzkie i jest najniebezpieczniejsze dla żywych organizmów; zatrzymywane jest

dopiero przez odpowiednie warstwy ołowiu lub uranu zubożonego, to znaczy materiałów ciężkich o wysokiej liczbie atomowej Z , a także przez warstwy betonu o znacznej grubości.

Promieniowanie neutronowe nie występuje w przyrodzie, a źródłem są reaktory atomowe lub cyklotrony i inne urządzenia do przyspieszania cząstek. Neutrony są cząstkami przenikliwymi, bez ładunku elektrycznego; w odpowiednich warunkach mogą powodować reakcje jądrowe. Ze względu na prędkość i energię odróżniane są neutrony prędkie o energii większej od 100 keV, neutrony termiczne o energii ok. 25 meV oraz neutrony epitermiczne o energii pośredniej, zwykle przyjmowane są wartości od 0,025 do 10 keV.

Neutrony prędkie otrzymywane są: w reakcjach jądrowych podczas bombardowania różnych jąder cząstkami naładowanymi lub kwantami γ o dużej energii oraz przy rozszczepieniach jąder. Spowalniane neutrony prędkie jako neutrony termiczne mają zastosowanie w reaktorach jądrowych.

Neutrony nie powodują jonizacji bezpośrednio, ale na skutek wzajemnego oddziaływania z atomami materiałów, przez które przechodzą, powstają różne rodzaje promieniowania: α , β , γ i X , powodujące jonizację, czyli odrywanie elektronów od atomów materii. Strumienie neutronów są rozpraszane i absorbowane przez warstwy betonu, wody lub parafiny w wyniku różnego rodzaju procesów, zachodzących między neutronem a jądrem atomu, np. folia kadmowa o grubości 1 mm absorbuje neutrony termiczne, ale przepuszcza neutrony epitermiczne oraz prędkie.

Do określania wielkości, występujących w zagadnieniach związanych z promieniowaniem, stosowane są następujące jednostki:

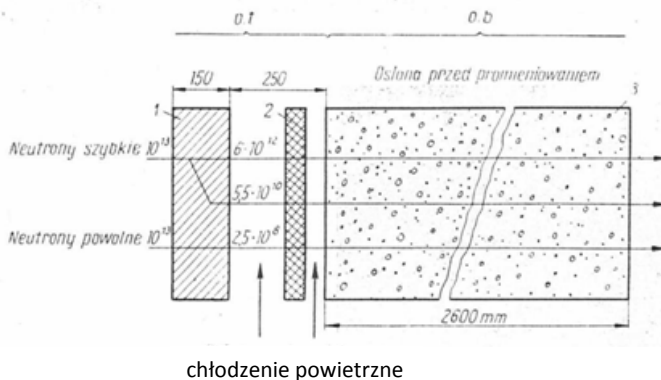
- bekerel [Bq], jednostka aktywności promieniotwórczej, jest to liczba jąder atomowych, ulegających rozpadowi w ciągu sekundy; np. 1 gram radu to $37 \cdot 10^9$ Bq, 1 tona skały granitowej to $7 \cdot 10^7$ Bq, dorosły mężczyzna ma średnio 10^4 Bq;
- grej [Gy], jednostka dawki pochłoniętej, odpowiada energii jednego dżula przekazanej jednemu kilogramowi masy, 1 J/1kg;
- siwert [Sv], jednostka dawki promieniowania równoważnej, to znaczy po uwzględnieniu, że nie wszystkie rodzaje promieniowania są jednakowo niebezpieczne, a w przypadku promieniowania β , γ i X obie te jednostki są równe 1 Gy = 1 Sv, natomiast w przypadku promieniowania α równoważność jest 1 Gy = 20 Sv. Dla neutronów, w zależności od ich energii 1Gy = od 5 do 20 Sv (wg Rozporządzenia Rady Ministrów z dn. 18 stycznia 2005r. Dz. U. z dn. 3 lutego 2005r. poz. 168 – czynnik wagowy promieniowania, do przeliczenia dawki pochłoniętej na równoważną).

W organizmach żywych promieniowanie może prowadzić do zmian w komórkach i trwałych uszkodzeń już przy doraźnie przyjętych ilościach ok. 0,5-1,0 Sv, natomiast przyjęcie 4 Sv uważa się za powodujące śmierć w 50% przypadków.

3. Osłony przed promieniowaniem

W elektrowniach atomowych budynki, w których znajdują się reaktory, a także instalacje o znaczeniu drugorzędnym są otoczone osłonami z różnych materiałów, aby ochronić otoczenie przed skutkami promieniowania, to znaczy osłabić je do poziomu dopuszczalnego. Zarówno kształty budynków i ich konstrukcja, jak i stosowane materiały (stal, ołów, zbiorniki z wodą i beton) mają na celu osłabianie promieniowania podczas normalnej eksploatacji, a także zatrzymanie w przypadku awarii. Szczególne znaczenie mają osłony z betonu ze względu na:

- względnie niski koszt wykonania i dostępność składników;



Rys. 2. Osłona pierwotna reaktora jądowego w Windscale; krotność osłabienia neutronów prędkich 10^{13} , a neutronów termicznych 10^{32} , kolejne warstwy to stal, osłona termiczna i beton o grubości 2,6 m, według Pohl (1967)

- możliwość wykonania osłon o rozmaitych kształtach;
- spełnianie równocześnie wymagań stawianych konstrukcjom budowlanym.

Przykładem wczesnego stosowania osłon betonowych może być reaktor jądowy w Windscale w Wielkiej Brytanii, zbudowany w latach 40. ubiegłego stulecia i wykorzystywany do produkcji izotopu ^{235}U do celów wojskowych. Na rys. 2 widać przekrój ściany osłonowej, której warstwa betonu miała grubość 2,6 m. W 1959 r. nastąpiła w tym reaktorze pierwsza awaria w historii rozwoju energii atomowej, a reaktory chłodzone powietrzem nie były później budowane.

Betonowe elementy osłonowe muszą spełniać różnorodne wymagania wytrzymałości mechanicznej, szczelności i trwałości, odpowiadającej przewidzianym okresom eksploatacji. Równocześnie stawiane są warunki hamowania promieniowania γ i zatrzymywania strumieni neutronów. Te dwie grupy wymagań stwarzają konieczność odpowiedniego projektowania i optymalizacji składu i kompozycji betonów, a także zabezpieczenia uzbrojenia lub sprzężenia elementów betonowych, aby zapewnić trwałość konstrukcji i odporność w sytuacjach awaryjnych.

Wymagania stawiane betonom osłonowym sformułowano w różnych publikacjach, m.in. według pracy Abramowicza i Ciasia (1976):

- jednorodność i jak najwyższa gęstość w celu spowolnienia strumienia neutronów;
- dostateczna zawartość wodoru, także przy wzroście temperatury, dotyczy to więc wody krystalizacyjnej, niezależnej od ilości wody zarobowej, określającej współczynnik w/c ;
- dobre przewodnictwo cieplne ze względu na możliwość podwyższenia temperatury i konieczność ograniczenia różnic temperatury i powstających naprężeń;
- niezbyt wysoka wartość modułu Younga;
- wytrzymałość i trwałość, stosownie do wymagań konstrukcyjnych i warunków eksploatacji.

Wymagania te nie uległy zasadniczym zmianom, natomiast w wyniku wieloletniej eksploatacji reaktorów atomowych i prowadzonych badań, wiedza w tej dziedzinie znacznie się poszerzyła. Okazuje się jednak, że ze względu na różny skład i właściwości kruszyw kopalnych, ostateczną kompozycję i technologię wykonania betonu osłonowego do określonych celów można opracować dopiero na podstawie pełnej znajomości użytych składników.

Hamowanie promieniowania X i fotonów γ następuje w warstwach różnych materiałów osłonowych, przy czym grubość osłon może być rekompensowana zwiększoną gęstością materiału i zdolnością do pochłaniania i osłabiania promieniowania. Z tego powodu stosowane są osłony wykonane ze stali i ołowiu, jako materiałów o wysokiej gęstości, a także betony o specjalnych składnikach.

Oslanianie przed promieniowaniem neutronowym jest bardziej skomplikowane; nie wystarczy wysoka gęstość materii, przy czym ze względu na różną energię neutronów oraz różnice w przekrojach czynnych pierwiastków, na które trafiają neutrony, konieczne jest różnicowanie osłon. Aby uniknąć lub przynajmniej ograniczyć zderzenia z atomami i powodowanie wtórnej emisji promieniowania γ , neutrony o mniejszych prędkościach powinny być hamowane przez materiały o mniejszej gęstości jak woda, parafina lub polietylen, jak również przez wodór zawarty w betonie, a fragmenty instalacji w reaktorach atomowych osłaniane są przez baseny z wodą. Osłabianie i hamowanie strumieni neutronów jest tym bardziej skomplikowane, że powstaje przy tym wspomniane drugorzędne promieniowanie γ .

Ponieważ w dojrzałym betonie zawartość wodoru to tylko ok. 0,25% masy betonu, a do spowolnienia neutronów konieczne jest co najmniej od 0,45 do 0,5%, jest więc potrzebne użycie kruszywa o odpowiednio wysokiej zawartości wodoru, Alexander i Mindess (2005), oraz zaprojektowanie betonu o dużym upakowaniu kruszywa. Okazało się przy tym w wyniku badań opublikowanych m.in. przez Kharita i in. (2010), że ilość wilgoci wyrażonej przez stosunek w/c w mieszance betonowej nie wpływa w sposób znaczący na zdolność hamowania neutronów i promieniowania γ ; badania te przeprowadzono na betonach z kruszywem piaskowcowym i przy w/c zmieniającym się w granicach od 0,42 do 0,63. Trzeba więc wprowadzać do betonu wodór zawarty w wodzie związanej w ziarnach kruszywa.

Trzeci rodzaj promieniowania – promieniowanie korpuskularne o bardzo dużych energiach, tzw. promieniowanie wysokoenergetyczne, powstaje w akceleratorach, np. w cyklotronach cząstki są przyspieszane do energii rzędu 100 – 1000 MeV. Stosowane są osłony o znacznych grubościach z betonów wysokowartościowych, zawierające co najmniej 0,4–0,5% wodoru w wodzie krystalizacyjnej. Zmniejszenie grubości osłon uzyskuje się przez zastosowanie kruszywa magnetytowego lub barytowego.

Skomplikowane warunki funkcjonowania osłon betonowych spowodowały konieczność przeprowadzenia wielu rozmaitych badań, aby określić właściwości betonu i sformułować wymagania do kompozycji betonu, doboru składników i projektowania konstrukcji betonowych. Nie oznacza to, że wszystkie zjawiska zachodzące w betonach osłonowych są jakościowo, a zwłaszcza ilościowo, w pełni poznane, tym bardziej, że zależą w dużym stopniu od zastosowanych materiałów składowych, przede wszystkim kruszyw, w znacznej części pochodzących ze źródeł lokalnych.

Niezależnie od wymienionych właściwości i wymagań, powszechnie stosowany beton w osłonach jest materiałem konstrukcyjnym.

Osłony mogą być także budowane z materiałów w postaci sypkiej, umieszczonych z pojemnikami stalowymi. Takie rozwiązanie opisane jest w pracy Calzada i in. (2011). Pojemniki ze sproszkowanym hematytem, kolemanitem i innymi materiałami, zatrzymującymi promieniowanie γ i neutronowe mogą być ustawiane w odpowiednich miejscach wokół źródeł promieniowania lub pomieszczeń dla personelu. Szacując wzrost kosztu o ok. 10% takiego rozwiązania w porównaniu do osłon betonowych, wskazano na korzyści wynikające m.in. z możliwości przestawiania osłon i powtórnego wykorzystania w przypadku przebudowy urządzeń. Brak informacji o szerszym stosowaniu takich rozwiązań.

4. Właściwości betonu w konstrukcjach osłonowych

4.1. Składniki, kompozycja i struktura

Już w 1989 roku Kaplan w swojej książce przedstawił stan wiedzy o projektowaniu betonu w ścianach i płytach, stanowiących osłony przed działaniem neutronów i promieniowania γ ; podstawowe opisane wymagania są aktualne również obecnie.

Ponieważ osłony betonowe mają zwykle znaczne grubości, to względy konstrukcyjne nie wymagają wysokich wytrzymałości, natomiast niezbędna jest odpowiednia trwałość i szczelność. Właściwości osłonowe związane są głównie z kruszywem, które wypełnia ok. 70% objętości elementów betonowych. Z tego powodu stosowane są kruszywa specjalne o zwiększonej zdolności zatrzymywania różnego rodzaju promieniowanie. Stosowane są na przykład rudy żelaza, np. hematyt i magnetyt, a także różne żużle i odpady hutnicze. Koszt osłon z różnych rodzajów betonu jest niższy niż z materiałów o wysokiej gęstości, jak stal, ołów czy zubożony uran, których zastosowanie jest ograniczone do bezpośredniej osłony reaktora. W tabeli 1 podane są przykłady specjalnych kruszyw i ich wpływu na właściwości osłonowe betonu.

Tabela 1. Rodzaje kruszyw w betonach osłonowych, według Mindess i in. (2003)

Naturalne Kruszywa	Gęstość [g/cm ³] (przybliżona)	Skuteczność osłony	Sztuczne Kruszywa	Gęstość [g/cm ³] (przybliżona)	Skuteczność osłony
bauksyt	2,0	prędkie neutrony (H)	ciężki żużel	5,0	promieniowanie γ
serpentyt	2,5		fosfor Ferro	6,0	
goetyt	3,5		Żelazokrzem	6,7	
limonit	3,5		stalowe opiłki	7,5	
borokalcyt	2,5	neutrony (B)	Ferroboron	5,0	neutrony (B)
kolemanit	2,5		węglik boru	2,5	
baryty	4,2	promieniowanie γ	stopiony bor	2,5	
magnetyt	4,5				
ilmenit	4,5				
hematyt	4,5				

(H) – działanie wodoru

(B) – działanie boru

Pojemniki na radioaktywne odpady wykonywane są z betonu, odpowiadającego wymaganiom długotrwałości, niekiedy z polimerobetonu i fibrobetonu, albo metalowe: ze stali węglowej lub miedzi. Pojemniki takie są umieszcza w podziemnych komorach, np. w starych wyrobiskach kopalnianych, również w obudowie betonowej, Bennett i Gens (2008). Lokalizacja składowisk powinna je zabezpieczać od wszelkich szkodliwych czynników zewnętrznych takich, jak ruchy tektoniczne i wpływ zasiarczonych wód podziemnych. W Polsce jedyne takie składowisko znajduje się w Różanie.

4.2. Beton z kruszywem zawierającym bor

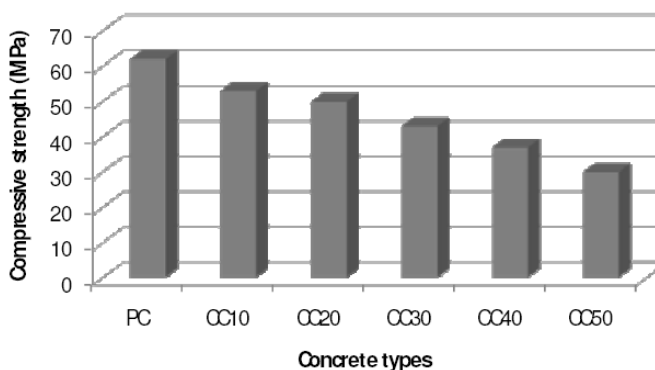
Kruszywa naturalne zawierające związki boru powodują zatrzymywanie neutronów, dzięki dużej zawartości wodoru, a także hamują promieniowanie γ . Są to różne minerały:

- kolemanit, uwodniony boran wapnia, ($2\text{CaO}\cdot 3\text{B}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$), o twardości między 4 a 5 i gęstości ok. 2.41 g/cm^3 , zawiera 51% czystego związku B_2O_3 ;
- tynkal, uwodniony boran sodu, boraks, ($\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \times 8\text{H}_2\text{O}$), o twardości 2–2,5;
- ulexit, uwodniony boran wapnia wodorotlenku sodu, ($\text{NaCa}[\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_6] \times 5\text{H}_2\text{O}$), także o twardości 2–2,5 i budowie włóknistej, z których najczęściej stosowany jest kolemanit jako częściowe zastąpienie zwykłego kruszywa w betonie. W Polsce nie występują złoża minerałów, zawierających bor.

Szczegółowe opisy zastosowania kolemanitu można znaleźć z publikacjach kilku autorów. Betony z kruszywem z piaskowca, zastąpionym w ilości 10–50% przez kolemanit badali Gencel i in. (2010). Wyniki wskazały, że kolemanit powoduje pogorszenie wszystkich właściwości mechanicznych proporcjonalnie do zastosowanej ilości, co widać na przykładzie na rys. 3, odnoszącym się do wytrzymałości na ściskanie. Również urabialność mieszanki betonowej pogarsza się wraz z ilością kolemanitu. Wymienieni autorzy sugerują ograniczenie ilości kolemanitu do 30% kruszywa, przy czym pogorszenie właściwości mechanicznych można częściowo rekompensować innymi sposobami. Yasar (1996) zalecał ograniczenie ilości kolemanitu nawet do 10% masy betonu.

Mortazavi i in. (2010) zastosowali łącznie dwa dodatki jako częściowe zastąpienie zwykłego kruszywa, uzyskując beton oznaczony skrótem CoGa (*ColemaniteGalena*) o następującym składzie i właściwościach: ruda ołowiu (galena) 3,548 kg, kolemanit 0,896 kg, woda 0,608 l, cement 0,95 kg, mikrokrzemionka 0,095 kg, $w/c = 0,58$, gęstość $4100\text{--}4650\text{ kg/m}^3$, wytrzymałość na ściskanie $39,8\text{--}46,4\text{ MPa}$. Charakterystyczna wartość HVL^* takiego betonu określono na 24,9 mm w porównaniu do 60 mm w przypadku betonu porównawczego o gęstości 2350 kg/m^3 ze zwykłego kruszywa, a także osłabienie strumienia neutronów w betonie CoGa było większe o 10%.

Zastosowanie związków boru badał również Kharita i in. (2011) jako domieszki do betonu, przy czym niektóre z tych związków uniemożliwiały twardnienie betonu, natomiast trzeci z nich – boraks dodawany w ilości 0,5% masy betonu ze zwykłym kruszywem



Rys. 3. Zależność wytrzymałości na ściskanie betonu od ilości kolemanitu, zastępującego od 0 do 50% zwykłe kruszywo, Gencel i in. (2010)

* Grubość warstwy materiału, która zatrzymuje 50% promieniowania jest oznaczana przez HVL

piaskowcowym powodował zatrzymywanie 80% promieniowania γ w ścianach o grubości rzędu 1,0 m; nie stwierdzono przy tym żadnego wpływu boraksu na twardnienie betonu.

4.3. Betony ciężkie

Powiększając gęstość kruszywa w betonie można uzyskać różne rodzaje tzw. betonów ciężkich, w których następuje spowolnienie promieniowania neutronowego. Wskazówki do projektowania betonów osłonowych można znaleźć już w książce Neville'a (1963)*, a także m.in. w pracy Kotona i Trybalskiego (2008). Kruszywa ciężkie naturalne to przede wszystkim baryt (szpat ciężki, siarczan baru $BaSO_4$), a także rudy żelaza: hematyt, magnezyt, limonit i ilmenit (żelaziak tytanowy); oprócz dużej gęstości limonit zawiera znaczne ilości wodoru w wodzie krystalizacyjnej, co wpływa na hamowanie neutronów.

Ciężkie pierwiastki w kruszywie spowalniają prędkie neutrony o energii do 10 MeV, pośrednie neutronu o energii powyżej 100 keV wymagają obecności wodoru, co jest potrzebne także w celu absorpcji powolnych neutronów o energii powyżej 100 eV. Co więcej, neutrony wywołują dodatkowe promieniowanie γ , a to wymaga obecności boru. Zawartość odpowiednich pierwiastków w kruszywie pozwala na zmniejszanie grubości warstw betonu, zachowując właściwości mechaniczne.

Komponując skład betonu trzeba mieć na uwadze odpowiednią urabialność oraz odporność na wysoką temperaturę. Kruszywo barytowe nie jest odporne na podwyższoną temperaturę ze względu na zależność rozszerzalności od kierunku i różną rozszerzalność od zaczynu cementowego. Współczynnik rozszerzalności liniowej betonu barytowego jest dwukrotnie większy niż betonu zwykłego. Nie jest więc zalecane stosowanie betonu barytowego w temperaturze powyżej 80°C (niektórzy autorzy dopuszczają 100°C), a limonitowego jeżeli temperatura może osiągnąć 200°C. Projektując betony ciężkie trzeba uwzględnić ich zwiększoną wodożądność, łatwość pylenia podczas mieszania i możliwość opóźnienia hydratacji. Wskazane jest wykonanie próbnych mieszanek w celu określenia właściwych proporcji i technologii w konkretnym zastosowaniu.

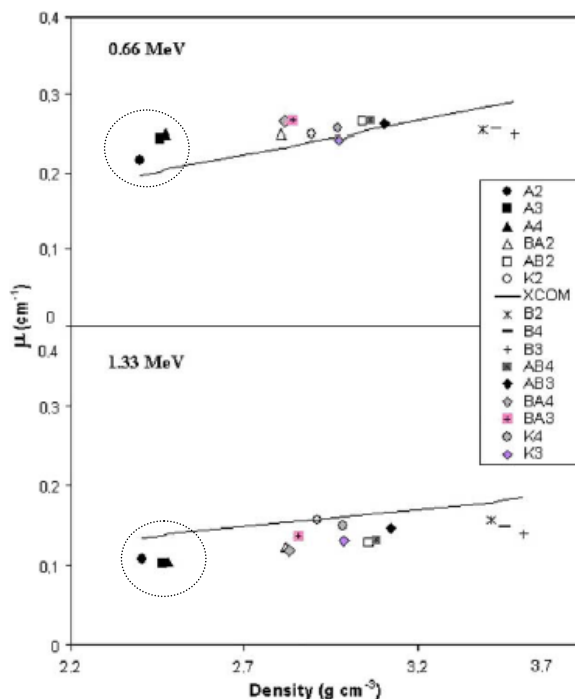
Różne rodzaje kruszyw z lokalnych skał posłużyły do badań opublikowanych przez Kharita i in. (2008), a w wyniku pomiarów stwierdzono skuteczność rudy hematytu zarówno w przypadku osłony przed strumieniem neutronów, jak i promieniowaniem γ .

Badania prowadzone przez Akkurt i in. (2006) wykazały skuteczność stosowania kruszywa barytowego, którym częściowo zastępowane jest kruszywo zwykłe. Baryt ($BaSO_4$) występuje w niewielkich ilościach na kuli ziemskiej w wielu miejscach, także w Polsce, i tu dostępny jest w postaci trzech frakcji 0–4; 0–6 i 6–32 mm, przy średniej gęstości ok. 3800 kg/m³. Według badań publikowanych w pracy Ablewicza i Dubrawskiego (1986) uzyskiwano wytrzymałość betonu z kruszywem barytowym na ściskanie 16–40 MPa i na rozciąganie przy rozłupywaniu ok. 10% tych wartości; określano także współczynnik rozszerzalności termicznej.

Na podstawie badań i obliczeń Akkurt i in. (2006) wyznaczyli wartości μ liniowego współczynnika tłumienia promieniowania w przypadku różnych betonów, charakteryzując ich zdolność do zatrzymywania promieniowania. Wartości μ uzyskano ze wzoru Lamberta

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

* W polskim wydaniu z 2000 r. tłumaczenia książki Neville'a nie ma tych informacji.



Rys. 4. Zależność μ – liniowego współczynnika tłumienia promieniowania przy różnych energiach promieniowania od gęstości betonu; wyniki odnoszące się do betonów zwykłych pokazano w kółkach, Akkurt i in. (2006)

w którym N oznacza intensywność (liczbę zdarzeń zarejestrowanych przez detektor) po przejściu przez przeszkodę, N_0 jest intensywnością promieniowania trafiającego na przeszkodę, x jest grubością przeszkody, przy czym zarówno N , jak N_0 są określane w trzech kierunkach, uwzględniając przy tym zmienność statystyczną pomiarów. Zdolność spowalniania promieniowania zgodnie z tą zależnością rośnie wraz z grubością warstwy i z wartością współczynnika μ . Wyniki uzyskane przy dwóch różnych energiach promieniowania 0,66 MeV i 1,33 MeV i rozmaitych kompozycji betonu pokazane są na rys. 4. Okazało się, że zwykłe betony o w/c od 0,43 do 0,65 zatrzymywały mniej promieniowania niż betony wykonane przy użyciu różnych kombinacji kruszywa barytowego i zwykłego albo całkowicie z kruszywa barytowego.

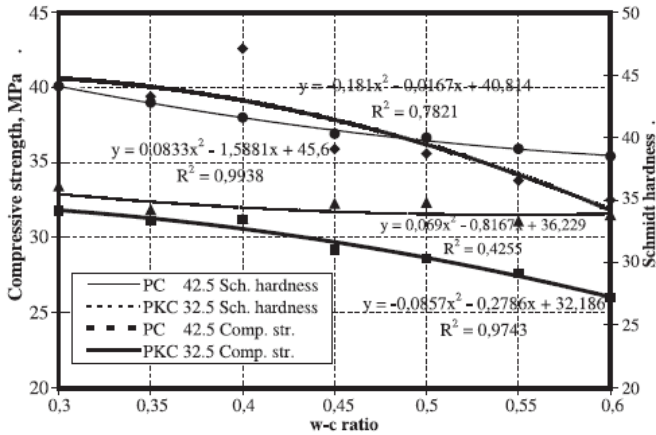
Wartość HVL jest odwrotnie proporcjonalna do współczynnika tłumienia. Jeżeli przyjmując jako jednostkę ilość dostarczanej energii promieniowania, a energię przechodzącą przez przeszkodę jako 0,5, to korzystając z równania (1) można napisać

$$0,5 = 1,0 e^{-\mu x} \quad \text{stąd} \quad x_{0,5} = \text{HVL} = 0,693/\mu \quad (2)$$

Pozwala to obliczyć (przy założeniu liniowej zależności) jaka powinna być grubość rozpatrywanej osłony, aby zredukować intensywność promieniowania na przykład do 1%:

$$x_{0,01} = \ln 0,01 / \mu = 4,60 / \mu.$$

Podstawowe właściwości mechaniczne betonu o gęstości ok. 4000 kg/m³, z kruszywem barytowym wyznaczył Topçu (2003) stosując dwa rodzaje cementu (PKC 32.5 i PC 42.5) w ilości 350 kg/m³, przy różnych wartościach w/c i z kruszywem barytowym



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie i twardość Schmidta betonów z kruszywem barytowym i z różnych cementów, jako funkcje w/c , Topçu (2003)

o rozmiarach ziaren od 0,5 do 16 mm. Na rys. 5 pokazane są wytrzymałość na ściskanie i twardość Schmidta jako funkcje w/c . Okazało się, że twardość jest mniej zależna od w/c niż wytrzymałość, a moduł Younga silnie zależy od rodzaju kruszywa barytowego, uzyskiwanego z różnych regionów. Wartości współczynnika spowalniania neutronów określono według dwóch zależności:

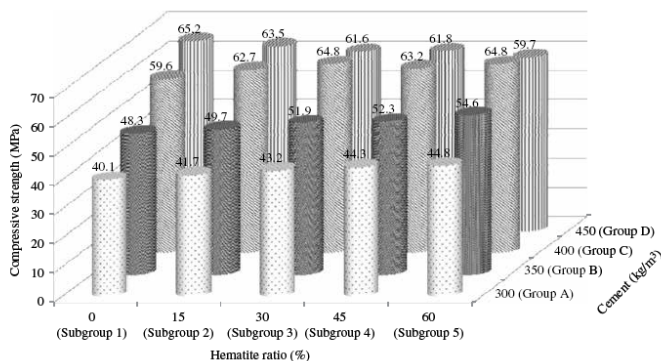
$$\mu = 0,055 e^{1,36c} \quad \text{i} \quad \mu = 0,006 e^{1,04d}$$

tu c oznacza procentowy udział barytu w kruszywie, a d jest gęstością betonu w kg/dm^3 . Stwierdzono przy tym, że współczynnik rozszerzalności termicznej jest dwukrotnie wyższy niż w betonie zwykłym, a przewodność cieplna jest niższa.

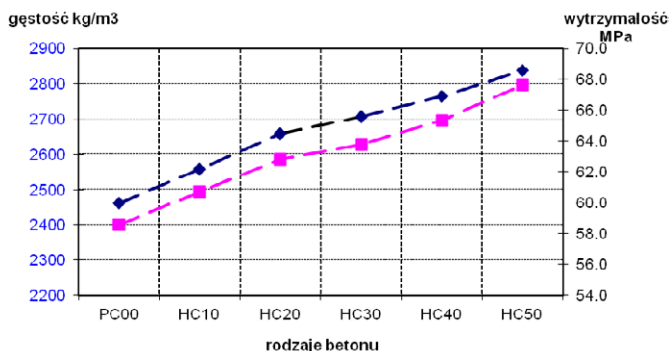
Mechaniczne właściwości betonu z kruszywem barytowym (o zawartości BaSO_4 równej 90%) badali również Kilincarslan i in. (2006) przy zawartości w stosunku do zwykłego kruszywa od 0 do 100%. Gęstość takiego betonu dochodziła do $3400 \text{ kg}/\text{m}^3$, wzrastał także moduł Younga, natomiast wpływ kruszywa barytowego na prędkość ultradźwięków i twardość Schmidta nie był wyraźny w odróżnieniu od wpływu stosunku w/c , który był decydujący, stąd wnioski autorów o braku wpływu barytu także na trwałość betonu.

Beton z częściowo zastąpionym kruszywem zwykłym (od 0 do 60%) przez rudę hematytowa badał Gencil (2011). Twardość hematytu, jego wytrzymałość i inne właściwości były zmienne; ruda była kruszona i podzielona na dwie frakcje: drobną i grubą, o gęstości 4,18 i 4,29, a zawartość cementu zmieniała się od 300 do $450 \text{ kg}/\text{m}^3$. Wytrzymałość na ściskanie wzrastała z ilością hematytu i cementu (rys. 6), rosła również wytrzymałość na rozciąganie przez rozłupywanie; było to spowodowane wysoką gęstością hematytu i dobrą przyczepnością do zaczynu cementowego. Wyniki badania uzasadniły pozytywną ocenę hematytu jako kruszywa w betonach osłonowych. W innej publikacji z tego samego roku Gencil i in. (2011) nie stwierdzili wpływ hematytu na spowolnienie neutronów, natomiast zauważyli poprawę ochrony przed promieniowaniem γ dzięki wyraźnemu powiększeniu gęstości betonu, widocznemu na rys. 7.

Badania przeprowadzone przez Ochbelagh i in. (2011) wykazały wpływ promieniowania γ na przebieg hydratacji cementu w próbkach zaczynu i zaprawy cementowej, które poddawano promieniowaniu $0,662 \text{ MeV}$ izotopu cezu Cs-137 przez okres 7 dni. Autorzy



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie betonu z kruszywem hematytowym w funkcji ilości cementu oraz procentowego udziału hematytu w kruszywie, Gencel (2011)



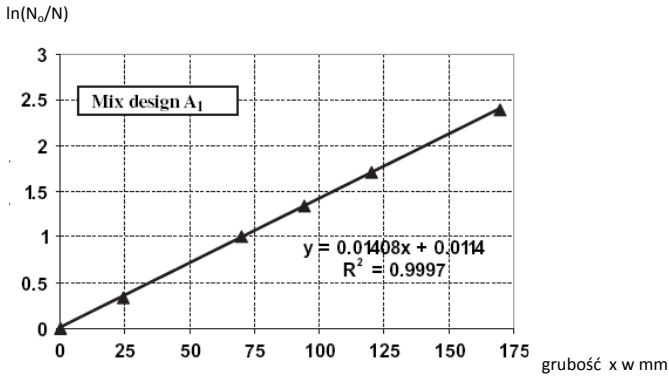
Rys. 7. Zależność gęstości i wytrzymałości na ściskanie betonu od zawartości rudy hematytowej w kruszywie od 0 do 50%, Gencel i in. (2011)

stwierdzili wzrost gęstości próbek z zaczynu, ponieważ promieniowanie oddziaływało na mikropory w zaczynie cementowym. Propozycja wyjaśnienia przyczyn tego zjawiska oparta jest na przypuszczeniu, że w porach zachodzi proces reakcji alkalicznej, co powoduje ich częściowe wypełnienie. Dodając do zapraw proszek ołowiany, uzyskano zarówno wzrost gęstości i wytrzymałości na ściskanie, jak również poprawę właściwości osłonowych. Brakuje szczegółowych danych o uzyskanych wynikach.

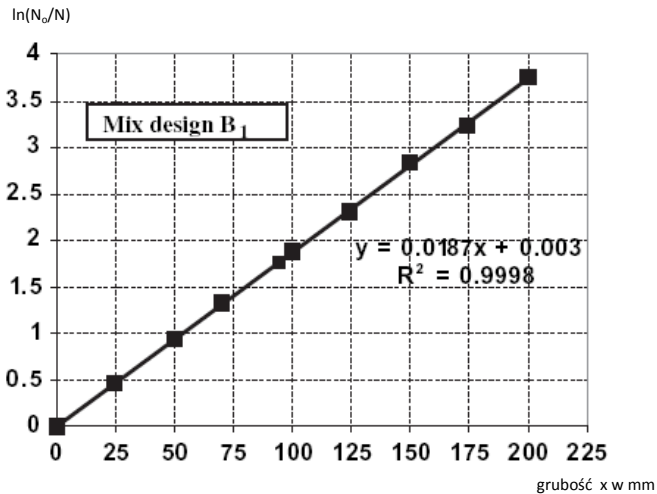
Badania opisane przez Mostofinejad i in. (2012) pozwoliły na uzyskanie zależności między współczynnikiem tłumienia promieniowania μ a grubością osłony betonowej x [mm], przy czym wyniki doświadczalne i obliczeniowe były zgodne; można je w przybliżeniu przedstawić następująco:

- w przypadku zwykłych betonów $\mu = 0,01408 x$,
 - w przypadku betonów z kruszywem barytowym $\mu = 0,0187 x$,
- korzystając z zależności (1) w postaci $\ln(N_0/N) = \mu x$, rys. 8 i 9.

Wytrzymałość na ściskanie betonów zwykłych była wyższa niż betonów barytowych o ok. 10% przy współczynniku $w/c < 0,4$, zaś niemal taka sama przy $w/c > 0,4$. Stwierdzono przy tym, że zmiany składu betonu, powodujące spadek gęstości przez wzrost



Rys. 8. Wykres funkcji $\ln(N_0/N)$ w zależności od grubości osłony x [mm] w betonie zwykłym, Mostofinejad i in. (2012)



Rys. 9. Wykres funkcji $\ln(N_0/N)$ w zależności od grubości osłony x [mm] w betonie barytowym, Mostofinejad i in. (2012)

w/s lub dodanie pyłów krzemionkowych, prowadzą do proporcjonalnego pogorszenia właściwości osłonowych betonu, tzn. współczynnika μ .

Ciężkie kruszywa sztuczne to stalowy śręt, ścinki, żelgruda lub pył i piasek ołowiany, jednak użycie takich kruszyw powiększa znacznie koszt i utrudnia wykonanie ze względu na możliwość segregacji mieszanki.

Według Ablewicza i Dubrowskiego (1986) w osłonach reaktora badawczego EWA w Świerku zastosowano beton o gęstości 2,6 z kruszywem limonitowym i złodem żelaznym, przy czym grubość warstw osłabienia połówkowego (HVL) określono na 80 mm i 64 mm ze względu na neutrony prędkie i termiczne.

Liczne wyniki doświadczalne badania betonów osłonowych z jednej strony dostarczają cennych informacji, ale równocześnie nie wszystkie publikowane rezultaty pomiarów są w pełni zgodne. Zjawiska spowalniania i absorpcji neutronów o różnych prędkościach

i energiach, a także wyzwalane przy tym wtórne promieniowanie γ są na tyle skomplikowane, że wymagają rozwiązywania w konkretnych przypadkach osłon. Stwarza to konieczność podjęcia prac w celu uzyskania odpowiednich kompozycji betonów, dostosowanych do różnych elementów konstrukcyjnych i osłonowych, uwzględniając także wymagania technologiczne oraz warunki krajowe. Oznacza to potrzebę przeprowadzenia różnorodnych badań przy użyciu lokalnych kruszyw i spoiw, a także importowanych kruszyw specjalnych, uwzględniając ich właściwości i warunki ekonomiczne stosowania, ponieważ zwiększony koszt betonu może być przynajmniej częściowo równoważony przez wykorzystanie możliwości ograniczenia grubości osłon z betonów.

Technologia wykonywania obudowy i osłon betonowych, często o znacznych rozmiarach, wymaga rozwiązywania poważnych trudności, związanych ze wspomnianą możliwością segregacji w przypadku stosowania ciężkich kruszyw, koniecznością ścisłego upakowania ziaren kruszywa, a także możliwością występowania wysokiej temperatury w elementach o znacznych grubościach na skutek hydratacji cementu. Obudowa reaktora i osłony to zwykle konstrukcje przestrzenne, o złożonych kształtach, a także karbach i otworach lub bruzdach, przy czym trzeba uwzględnić wspomnianą wyżej okoliczność, że współczynnik odkształcalności termicznej betonów ciężkich jest około dwukrotnie większy niż w przypadku betonów zwykłych.

5. Wpływ promieniowania na właściwości betonu

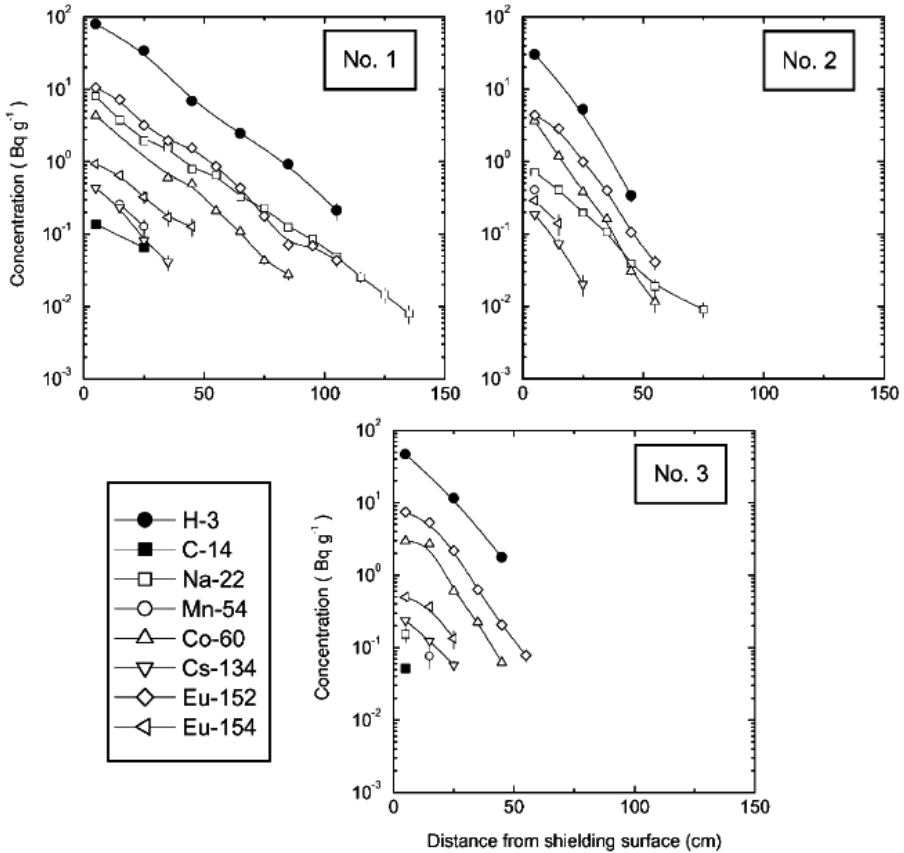
5.1. Promieniotwórczość wtórna i degradacja właściwości betonu

Beton w osłonach, które podczas normalnej eksploatacji reaktora są stale narażone na promieniowanie, a także w osłonach składowisk odpadów radioaktywnych i magazynów izotopów w zakładach medycznych, zachowują się w sposób szczególny. Dotyczy to:

- aktywacji betonu; to znaczy, że neutrony powodują powstawanie radioaktywnych izotopów pierwiastków, a beton staje się radioaktywny, ze wszystkimi związanymi z tym konsekwencjami;
- zwiększenia wartości współczynników rozszerzalności liniowej w betonach z kruszywem barytowym, hematytowym i magnetytowym;
- zwiększenia współczynników charakteryzujących przepuszczalność powietrza i wilgoci przez beton;
- dodatkowej karbonatyzacji zaprawy cementowej pod wpływem promieniowania γ , i związanych z tym zmian struktury i właściwości;
- spadku wytrzymałości betonu na skutek radiolizy wody zawartej w przestrzeniach międzycząsteczkowych i wody molekularnej;
- zmniejszenia porowatości betonu.

5.2. Aktywacja betonów osłonowych

Beton w osłonach podlegających promieniowaniu wykazuje aktywację, co musi być uwzględniane podczas rozbiórki osłon betonowych. Zjawisko aktywacji betonu pod wpływem promieniowania zostało stwierdzone dopiero od 1980 roku; polega na powstawaniu radioaktywnych izotopów pierwiastków, znajdujących się w betonie. Tylko termiczne i epitermiczne neutrony mogą w sposób istotny powodować aktywację niektórych jąder atomowych w betonie, aby stały się radioaktywne, Alhajali i in. (2009). Może

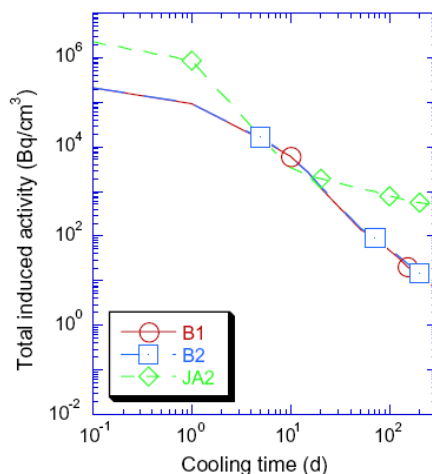


Rys. 10. Rozkład koncentracji w betonie kilku radioaktywnych izotopów w funkcji odległości od powierzchni narażonej na promieniowanie, Endo i in. (2004)

to narażać na napromieniowanie personel, zajmujący się dostarczaniem paliwa i pracami konserwacyjnymi w obrębie reaktora atomowego. Zagrożenie takie może wystąpić także podczas wyłączenia i rozbioru reaktora. Badania próbek z takich betonów prowadzi się po odpowiednim czasie, aby zredukować ewentualne promieniowanie.

Informacje o radioaktywności pozostającej w betonowych osłonach opublikowali Phillips i in. (1986). Yasar (1996) uzyskał wyniki obliczeń, opartych na danych o energii promieniowania i o połowicznym okresie rozpadu poszczególnych pierwiastków promieniotwórczych w składzie betonu zwykłego i betonu z kruszywem kolemanitowym, zastępującym 10% masy kruszywa zwykłego. Wyniki wskazują na niewielkie dalsze różnice w radioaktywności tych betonów już po roku trwania napromieniowania, co może oznaczać osiągnięcie stabilizacji, ale były to tylko wyniki obliczeń, a nie badań materialnych.

Systematyczne badania promieniowania γ przez izotopy wodoru ^3H i węgla ^{14}C przeprowadzili Endo i in. (2004), pobierając próbki betonu z różnych miejsc obudowy urządzeń wytwarzających strumień neutronów w Japonii. Osłony były poddane działaniu strumienia neutronów przez okres ponad dwóch lat, a badania przeprowadzono na



Rys. 11. Wykres sumy aktywności betonu w funkcji czasu chłodzenia, Morioka i in. (2004)

próbek, pobranych z trzech różnych miejsc tych osłon. Na rys. 10 pokazane są wykresy intensywności promieniowania γ , wyrażone w Bq/g w stosunku do masy betonu, w odniesieniu do tych i innych izotopów. Widać wyraźne szybkie tłumienie radioaktywności wraz z grubością warstwy betonu. Uwaga badających była skupiona na wymienionych dwóch izotopach radioaktywnych ze względu na ich różną długowieczność, wyrażającą się okresami 12 i ponad 5700 lat połowicznego rozpadu.

Zmniejszenie aktywności betonu osłonowego uzyskano przez domieszkę węgla bory B₄C w ilości 1,0(B1) i 2,1(B2) % masy betonu, Morioka i in. (2004). Płyty o grubości 200 mm z betonu tak przygotowanego poddawano oddziaływaniu skupionej wiązki neutronów o różnej energii, a następnie mierzono aktywność ich promieniotwórczości wyrażoną w w Bq/cm³ betonu w funkcji czasu od zakończenia napromieniowania (rys. 11). Okazało się, że chociaż po okresie 7–10 dni chłodzenia próbki z węglikiem bory wykazały większą aktywność w porównaniu do identycznych próbek ze zwykłego betonu (JA2), to jednak już po 30 dniach aktywność tych próbek była co najmniej 100 razy niższa, co uzasadnia wnioski o znacznych korzyściach stosowania betonów osłonowych o zmniejszonej zdolności do aktywacji.

Badania długotrwałej aktywności promieniotwórczej w betonach zawierających specjalne kruszywa, np. barytowe, prowadzili Żagar i in. (2004), którzy stwierdzili najdłużej trwającą zdolność izotopów ¹³³Ba, ⁶⁰Co i ¹⁵²Eu do emitowania fotonów γ . Na tej podstawie przewidują, że promieniotwórczość odpadów betonu zawierających te izotopy będzie trwała do ok. 100 lat, co wynika z najtrwalszego izotopu ¹³³Ba, przy czym okres połowicznego rozpadu wynosi w przybliżeniu 10 lat. Autorzy tej publikacji zwracają uwagę, że progi dopuszczalności (*clearance levels CL*) określone przez IAEA* powinny być zmodyfikowane, aby obejmowały w pełni promieniotwórczość odpadów betonu.

Napromienianie betonu ma znaczenie przy pracach rozbiórkowych, które prowadzi do nagromadzenia odpadów radioaktywnych w postaci gruzu, co wymaga kompetentnego kwalifikowaniu odpadów betonowych z konstrukcji osłonowych i ich odpowiedniego składowania. Rozważane są rozwiązania w postaci ścian warstwowych, w których warstwy konstrukcyjne podlegałyby bardzo ograniczonemu promieniowaniu,

* IAEA – International Atomic Energy Agency

zatrzymanemu przez warstwy zewnętrzne. W ten sposób objętość odpadów radioaktywnych mogłaby być bardzo zmniejszona, Sato i in. (2011).

Mimo znacznego zasobu wiedzy, uzyskanej w ciągu ostatnich kilku lat na temat zachowania się betonów konstrukcyjnych pod wpływem napromieniowania, nie wydaje się, aby zjawiska szczególnie związane z aktywacją betonu były w pełni rozpoznane i zapewne konieczne jest doświadczalne potwierdzenie wniosków podawanych w publikacjach, m.in. ze względu na różnorodność składu betonów osłonowych w różnych krajach. Co więcej, okazuje się, że w większości instalacji związanych z energetyką jądrową występują łącznie wszystkie rodzaje opisywanego tu promieniowania, więc osłony muszą często odpowiadać różnorodnym wymaganiom. Zwłaszcza w osłonach przed promieniowaniem wysokoenergetycznym konieczne jest tzw. kaskadowe systemy osłabiania, Ablewicz i Józwick (1978).

5.3. Zmiany właściwości fizycznych betonu poddanego promieniowaniu

Rozszerzalność liniowa była badana na niewielkich, izolowanych próbkach w zakresie od 20 do 80°C, Abramowicz, Ciał (1975). Próbki walcowe o średnicy 160 mm i wysokości 480 mm były zaopatrzone w dwa termistory wewnątrz betonu i były ogrzewane za pośrednictwem warstwy wody, izolowanej od betonu. Badano trzy rodzaje betonu: zwykły z kruszywem bazaltowym i piaskiem, z kruszywem barytowym 4–40 mm oraz z kruszywem mieszanym: barytowym 3–40 mm i magnetytowym 0–40 mm. Uzyskano następujące wartości liniowego współczynnika odkształcalności α :

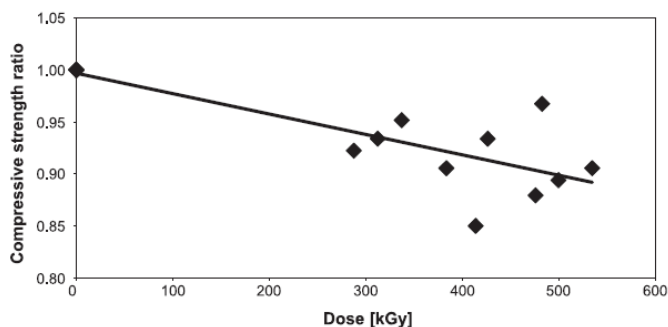
- beton zwykły $9,13 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- beton barytowy $17,65 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- beton barytowo-magnetytowy $16,75 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,

przy czym stosowanie ogrzewania cyklicznego nie powodowało istotnych różnic. Wartości te są bliskie do podawanych w innych publikacjach.

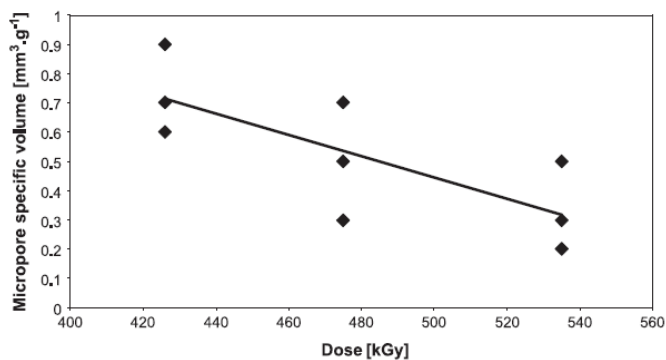
Wpływ promieniowania γ na wzrost objętości kruszywa w betonie zauważyli Harbsemeier i Bolse (1998), co jest spowodowane transformacją fazową postaci krystalicznej kwarcu (tlenek krzemu SiO_2) w bepostaciową. W tym samym okresie Bouniol i Aspart (1998) zwracali uwagę na radiolizę wody, opisaną już przez Marię Skłodowską-Curie, i reakcje zachodzące między wapnem Ca i nadtlenkiem wodoru H_2O_2 . Zjawiska te mogą powodować ciśnienie i zarysowania w betonie, a także powstawanie gazu w postaci H_2 – dwuatomowej cząsteczki wodoru, który może wywołać eksplozję; jest to szczególnie niebezpieczne w składowiskach odpadów radioaktywnych, w których napromieniowanie może trwać przez długie okresy.

Sopko i in. (2004) stwierdzili obniżenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie betonu z naturalnego kruszywa w wyniku działania jonizującego promieni γ . Przypisali to działaniu radiolizy wody, które w betonie polega na zmianie składu fazowego betonu i zmniejszeniu stopnia hydratacji cementu. Zmiany wytrzymałości są proporcjonalne do ilości pochłoniętego promieniowania i sięgają ok. 10% pierwotnych wartości, przy znacznych rozrzutach.

Vodak i in. (2005) badając próbki po różnych procesach starzenia w naturalnym środowisku i poddawane promieniowaniu γ stwierdzili powstawanie kryształów kalcytu wraz z ilością napromieniowania oraz zmniejszanie porowatości. Na rys. 12 widać spadek wytrzymałości na ściskanie wraz z ilością pochłoniętego promieniowania γ . Podobne zależności uzyskano także w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie i zginanie próbek betonowych. Spadek całkowitej porowatości widać na wykresie na rys. 13, podobne zmiany zaobserwowano także w różnych grupach rozmiarów porów.



Rys. 12. Zależność wytrzymałości na ściskanie betonu od pochłoniętego promieniowania γ . Wytrzymałość betonu porównawczego wynosiła 69,4 MPa przy dawce 0, według Vodak i in.(2005)



Rys. 13. Zależność porowatości betonu od pochłoniętego promieniowania γ . Porowatość betonu porównawczego wynosiła 12% przy dawce 0, według Vodak i in. (2005)

W późniejszej publikacji Vodak i in. (2011) również przedstawili wyniki badań w postaci zmian rozkładu i wielkości porów w betonie, także z naturalnego kruszywa, i potwierdzili powstawanie portlandytu i kalcytu. Stwierdzili zjawisko dodatkowej karbonatyzacji, która rozwijała się równolegle z naturalną karbonatyzacją. O ile naturalna karbonatyzacja jest związana z dyfuzją CO_2 w betonie i występuje przede wszystkim w warstwie zewnętrznej, to karbonatyzacja spowodowana promieniowaniem γ zachodzi w całej objętości. Wraz ze wzrostem ilości pochłoniętego promieniowania przez próbki betonu od 0 do 1,5 MGy zaobserwowano zmniejszenie masy próbek na skutek hydrolyzy wody, zmniejszenie średniej wielkości porów w matrycy cementowej oraz wzrost twardości i pojawienie się mikrorys. Były to zjawiska o dużych rozrzutach i niewielkich wartościach, co utrudnia bezpośrednie wykorzystanie wyników i raczej wskazuje na konieczność dalszych badań.

6. Trwałość i monitorowanie jakości betonu w osłonach

Konstrukcje betonowe w elektrowniach jądrowych podlegają tym samym procesom starzenia i czynnikom destrukcyjnym, co wszystkie pozostałe konstrukcje. Czynniki

atmosferyczne, korozyjny wpływ podłoża gruntowego, a także zjawiska zachodzące w strukturze betonu (np. reakcja alkaliczna), mogą wpływać destrukcyjnie na obudowę reaktora i na wszystkie pozostałe konstrukcje betonowe w obrębie elektrowni. Negatywne zjawiska w postaci uszkodzeń powierzchni, wystawionych na działania cykli zamrażania, pojawiania się rys lub lokalnych pęknięć, a także zmiany sił w ciągach sprężających, mogą świadczyć o spadku nośności poszczególnych elementów lub o zmniejszeniu szczelności osłon. Wszystkie takie defekty muszą być rejestrowane, a ich znaczenie oceniane z punktu widzenia ewentualnej konieczności dalszych działań, Naus (1999).

W elementach betonowych poddanych promieniowaniu konieczna jest szczególnie systematyczna kontrola i wykonywanie zabiegów naprawczych, Naus (2009), a innym wymaganiom podlegają osłony, w których beton mógłby być narażony na promieniowanie tylko w sytuacjach awaryjnych, a więc nie znajdujących się pod działaniem promieniowania. Warstwy betonowe mogą osłaniać otoczenie od źródeł promieniowania albo zabezpieczać personel i otoczenie. Zagadnienia związane z eksploatacją reaktorów atomowych nabierają szczególnego znaczenia wobec poważnych kosztów wynikających z wymagania zapewnieniem trwałości, konieczności stosowania wielu specjalnych zabiegów technicznych, a w niektórych krajach także ze znacznej liczby elektrowni atomowych. Według IAEA w końcu 2010 r. było 441 elektrowni atomowych na świecie, z czego 152 funkcjonujących już powyżej 30 lat, a 358 – powyżej 20 lat. Obecnie można odróżnić kilkanaście rodzajów reaktorów atomowych; w licznych reaktorach typu PWR (Pressurized light- Water-moderated and cooled Reactor - reaktor ciśnieniowy chłodzony i moderowany za pomocą lekkiej wody* szczelność zbiornika, obejmującego reaktor zapewniona jest przez pancierz stalowy w cylindrycznym walcu betonowym, stojącym na betonowej płycie fundamentowej i pokrytym kopułą z betonu. Średnica walca jest rzędu 40–50 m, a wysokość 60–70 m. Ściany mają grubość ok. 1,0–1,4 m, a fundament 2,7–4,1 m.

Eksploatacja reaktorów atomowych jest regulowana ścisłymi przepisami, związanymi z bezpieczeństwem, a dotyczącymi także konstrukcji betonowych. W USA okres dozwolonej eksploatacji jest ograniczony do 40 lat, a po odpowiednich badaniach może być przedłużony; zakres takich badań jest również określony przepisami, podobnie jak w innych krajach. Interesujące informacje o badaniach kontrolnych reaktorów w USA i o podejmowanych naprawach można znaleźć np. w publikacjach Nausa i współautorów (1996), (1999) i (2009), a także w innych artykułach tego zespołu, ogłaszanych w latach 1999, 2006 i 2008.

Przykład fragmentu kontroli technicznej opublikowali Zheng Y.G. i Li H.Q. (2011), ograniczając się do pomiarów trzech wielkości, charakteryzujących beton w sprężonych budynkach betonowych dwóch reaktorów atomowych po pięcioletniej ich eksploatacji, zwracając uwagę na procesy starzenia betonu, związane z oddziaływaniami klimatycznymi oraz ewentualnymi przeciekami płynów chłodzących z reaktorów. Te wielkości to: przepuszczalność powietrza, sorpcyjność i przepuszczalność wody. Interesująca jest propozycja kryteriów jakości betonu ze względu na te wielkości, pokazana w tabeli 2. Na podstawie pomiaru tych trzech wielkości oceniono jakość betonu w dwóch obiektach. W jednym z obiektów stwierdzono bardzo dobrą szczelność, a w drugim – tylko dobrą, zalecając dalsze obserwację i kontrolę. Nie podano ani wartości, uzyskanych w tych konstrukcjach bezpośrednio po wykonaniu, ani sugestii co do przyczyn zmian.

* woda pod ciśnieniem 15 MPa

Tabela 2. Kryteria oceny jakości betonu ze względu na szczelność, Zheng Y.G. i Li H.Q. (2011)

Wielkości	Kryteria jakości betonu			
	bardzo dobra	Dobra	słaba	bardzo słaba
przepuszczalność powietrza [ln(10 ² Pa).min ⁻¹]	≤ 0,10	0,10 – 0,50	0,50 – 0,90	> 0,90
sorpcyjność (10 ⁻⁷ m ³ min ^{-1/2})	≤ 1,30	1,30 – 2,60	2,60 – 3,40	> 3,40
przepuszczalność wody (10 ⁻⁷ m ³ min ^{-1/2})	≤ 3,70	3,70 – 9,40	9,40 – 13,80	> 13,80

Cykle zamrażania i rozmrażania elementów z betonu barytowe mogą powodować wyraźne zmiany wartości współczynnika μ , który charakteryzuje zdolność tłumienia promieniowania γ . Badania tych zmian w przypadku kruszywa barytowego zawierającego aż 90% BaSO₄ opublikowali Basyigit i in. (2006). W szczególności, stwierdzono spadek wartości μ wraz z liczbą cykli do 50, przy czym ten współczynnik był zawsze wyższy w betonie barytowym, w porównaniu do betonu ze zwykłego kruszywa. Natomiast okazało się, że wzrost gęstości i w/c w betonie barytowym powodował wzrost wartości μ . We wnioskach jednak nie zalecono stosowania kruszywa barytowego w osłonach betonowych, narażonych na zamrażanie.

Zagadnienia związane w systematyczną kontrolą stanu konstrukcji betonowych w elektrowniach atomowych mają szczególne znaczenie w USA wobec okoliczności, że wiele z nich pracuje ponad 20 lat, a niektóre zbliżają się do wieku 40 lat, co oznacza konieczność podjęcia decyzji o przedłużeniu eksploatacji lub o rozbiórce. Podobna sytuacja jest także we Francji i w kilku innych krajach.

W Polsce tematyka eksploatacji i trwałości konstrukcji betonowych w reaktorach atomowych powinna być szczegółowo poznana, aby uniknąć błędów popełnionych przez innych, albo przynajmniej ograniczyć zakres nietrafnych rozwiązań materiałowych, konstrukcyjnych i wykonawczych. Warto więc przygotować zawnazu procedury związane z eksploatacją i systematyczną kontrolą tych konstrukcji.

Próbki betonu pobrane z osłon odpadów nisko-aktywnych w składowisku w Różanie po okresie 40 lat nie wykazały żadnych zmian strukturalnych, a trwałość użytego betonu oceniono pozytywnie, Szteke i in. (2010).

7. Podsumowanie

Poziom wiedzy o zastosowaniu betonu w budownictwie związanym z energetyką jądrową znacznie podniósł się w porównaniu do poprzedniego okresu, w którym podejmowano tę tematykę w Polsce.

Zapoznanie się z obecnym stanem wiedzy i techniki stanowi element wstępny, który musi być uzupełniony szczegółowymi badaniami, przeprowadzonymi na podstawie znajomości dostępnych materiałów i warunków meteorologicznych w kraju, wymagań normowych, a także rozpoznania warunków ekonomicznych, m.in. kosztów związanych z importem składników betonu.

Zakres badań musi być dostosowany do zamierzeń inwestycyjnych, a kierunki i tematy powinny być podejmowane w porozumieniu z przedsiębiorstwami wykonawczymi. Jest niezmiernie ważne dla dalszego rozwoju wiedzy i techniki w tej dziedzinie, aby prace badawcze były w jak największym stopniu prowadzone w kraju i rozpoczęte z odpowiednim wyprzedzeniem w stosunku do rozpoczęcia projektowania i realizacji inwestycji budowlanych. Dotyczy to w znacznej mierze prac budowlanych wykonywanych przez krajowe przedsiębiorstwa, jak i kontrolowania ewentualnych realizacji prowadzonych przez firmy zagraniczne.

Podziękowanie

Autor wyraża podziękowanie dla dr. inż. Jakuba Ośko z Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku za kompetentne uwagi do tekstu referatu.

Literatura:

- [1] Ablewicz Z., Józwiak B. (1978) Budownictwo w technice jądrowej. Arkady, Warszawa, s. 313.
- [2] Ablewicz Z., Dubrowski W.B. (1986) Osłony przed promieniowaniem jonizującym. Arkady, Warszawa, s. 300.
- [3] Abramowicz M., Ciał A. (1975b) Rozszerzalność liniowa betonów osłonowych. Arch. Inż. Łąd., 21, 4, 667–677.
- [4] Akhurt I., Basyigit C., Kilincarslan S., Mavi B., Akhurt A. (2006) Radiation shielding of concretes containing different aggregates. Cem. & Concr. Res., 28, 153–157.
- [5] Alexander M., Mindess S. (2005) Aggregates in concrete. Taylor & Francis, 435 pp.
- [6] Alhajali S., Kharita M.H., Naoom B., Yusef S., AlNassar M. (2009) Estimation of the activation of local reactor shielding concretes. Progress in Nuclear Energy, 51, 374–377.
- [7] Basyigit C., Akkurt J., Altindag R., Kilincarslan S., Akkurt A., Mavi B., Karaguzel R. (2006) The effect of freezing-thawing (F-T) cycles on the radiation shielding properties of concretes. Building and Environment, 41, 1070–1073.
- [8] Bennett D.G., Gens R. (2008) Overview of European concepts for high-level waste and spent fuel disposal with special reference waste container corrosion. J. of Nuclear Materials, 379, 1–8.
- [9] Bouniol P., Aspart A. (1998) Disappearance of oxygen in concrete under irradiation: the role of peroxides in radiolysis. Cem. & Concr. Res., 28, 11, 1669–1681.
- [10] Calzada E., Grünaur F., Schillinger B., Türk H. (2011) Reusable shielding material for neutron- and gamma- radiation. Nucl. Instr. and Methods in Ph. Res. A 651, 77–80.
- [11] Endo A., Harada Y., Kawasaki K., Kikuchi M. (2004) Measurement of depth distributions of ^3H and ^{14}C induced in concrete shielding of an electron accelerator facility. Applied Radiation and Isotopes, 60, 955–958.
- [12] Gencil O. (2011) Physical and mechanical properties of concrete containing hematite as aggregates. Sci. Eng. Compos. Mater, 19, 2, 191–199.
- [13] Gencil O., Brostow W., Ozel C., Filiz M. (2010) An investigation on the concrete properties containing colemanite. Int. J. of Physical Science, 5, 3, 216–225.
- [14] Harbsmeier F., Bols W. (1998) Ion beam induced amorphization in α quartz. J. of Applied Physics, 83, 8, 4049–4054.
- [15] Kaplan M.F. (1989) Concrete radiation shielding. John Wiley & Sons, N.York.
- [16] Kharita M.H., Yousef S., Al Nassar M. (2010) The effect of the initial water to cement ratio on shielding properties of ordinary concrete. Progress in Nuclear Energy, 53, 491–493.
- [17] Kharita M.H., Yousef S., AlNassar M. (2011) Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete. Progress in Nuclear Energy, 53, 207–211.
- [18] Kharita M.H., Takeyeddin M., Alnassar M., Yousef S. (2008) Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics. Progress in Nuclear Energy, 50, 33–36.

- [19] Kilincarslan S., Akhurt I., Basyigit C. (2006) The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete. *Materials Science and Engineering A* 424, 83–86.
- [20] Koton A., Trybalski P. (2008) Beton barytowy jako osłona przed promieniowaniem radioaktywnym. *Stowarzyszenie Producentów Cementu, Konf. „Dni Betonu”*, Wisła, 685–694.
- [21] Mindess S., Young J.F., Darwin D. (2003) *Concrete*, 2nd ed., Prentice Hall, ss. 644.
- [22] Morioka A., Sato S., Kinno M. et al. (2004) Irradiation and penetration tests of boron-doped low activation concrete using 2.45 and 14 MeV neutron sources. *J. of Nuclear Materials*, 329-333, 1619–1623.
- [23] Mortazavi S.M.J., Mosleh-Shirazi M.A., Raadpeyl N., Baradaran-Ghahfarokhi M. (2010) High-performance heavy concrete for multi-purpose shield. *Oxford Journals on-line*, October.
- [24] Mostofinejad D., Reisi M., Shirani A. (2012) Mix design effective parameters on c-ray attenuation coefficient and strength of normal and heavyweight concrete. *Construction and Building Materials*, 28, 224–229.
- [25] Naus D.J., Oland C.B., Ellingwood B.R., Graves III H.L., Norris W.E. (1996) Aging management of containment structures in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 166, 367–379.
- [26] Naus D.J. ed. (1999) Considerations for use in managing the aging of nuclear power plant concrete structures. *RILEM Report 19*, s. 206.
- [27] Naus D.J. (2009) The management of aging in nuclear power plant concrete structures, *JOM*, 61, 7, 35–41, July.
- [28] Neville A.M. (1963) *Properties of Concrete*, Pitman, s. 532.
- [29] Ochbelagh D.R., Khani S.A., Mosavinejad H.G. (2011) Effect of gamma and lead as an additive material on the resistance and strength of concrete. *Nuclear Engineering and Design* 241, 2359–2363.
- [30] Phillips A.B., Prull D.E., Ristinen R.A. i in. (1986) Residual radioactivity in a cyclotron and its surroundings. *Health Phys.*, 51, 337–342.
- [31] Pohl E. (1967) *Technika jądrowa w budownictwie*. Arkady, Warszawa, s. 261.
- [32] Sato S., Maegawa T., Yoshimatsu K., Sato K., Nonaka A., Takakura K., Ochiai K., Konno C. (2011) Development of a low activation concrete shielding wall by multi-layered structure fo a fusion reactor. *J. of Nuclear Materials*, 417, 1131–1134.
- [33] Sopko V., Trtík K., Vodák F. (2004) Influence of γ irradiation on concrete strength. *Acta Polytechnica*, 44, 1, 57–58.
- [34] Szteke W., Hajewska E., Biłous W., Przyborska M., Malczyk A., Wasiak J., Wieczorkowski M., Rozenblicki Z. (2010) Badanie betonów stosowanych w technologiach jądrowych, IEA Polatom, Raport A 145, 73–79.
- [35] Topçu I.B. (2003) Properties of heavyweight concrete produced with barite. *Cem.&Concr.Res.*, 33,6, 815–822.
- [36] Vodak F., Trtik K., Sopko V., Kapickova O., Demo P. (2005) Effect of γ -irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures. *C&CR*, 35, 1447–1451.
- [37] Vodak F., Vydra V., Trtik K., Kapickova O. (2011) Effect of gamma irradiation on propertie of hardened cement paste. *Materials and Structures*, 44, 101–107.
- [38] Yazar Y. (1996) Activation characteristics of concrete shields containing colemanite. *J. of Nuclear Materials*, 233–237, 1511–1515.
- [39] Zheng Y., Li H. (2011) Evaluation of protective quality of prestressed concrete containment buidlings of nuclear power plant. *J.Cent.South.Univ.Technol.*, 18, 238–243.
- [40] Žagar T., Božič M., Ravnik M. (2004) Long-lived activation products in TRIGA Mark II research reactor concrete shield: calculation and experiment. *J. of Nuclear Materials*, 335, 379–386.
- [41] International Atomic Energy Agency (IAEA), P.O. Box 100, Wagramer Strasse 5, A-1400 Vienna, Austria, Official.Mail@iaea.org.