

## Beton jako materiał osłon przed promieniowaniem jądrowym – przegląd<sup>1</sup>

## Application of concrete as a material for anti-radiation shielding – a review<sup>1</sup>

### 1. Wprowadzenie

Betony różnego rodzaju są powszechnie stosowane w budownictwie związanym z wytwarzaniem energii w reaktorach atomowych jako materiały konstrukcyjne i osłonowe. Można odróżnić cztery zakresy wykorzystania betonu w tym dziale budownictwa: obudowa pierwotna reaktora, wewnętrzna konstrukcja, obudowa drugorzędna (budynek), wreszcie inne konstrukcje pomocnicze. Konstrukcje betonowe są więc używane w kolejnych strefach bezpieczeństwa, otaczających rdzeń reaktora, a także w budynku, w którym znajduje się reaktor. Elementy betonowe, zbrojone lub sprężone, osłaniają od promieniowania personel i całe otoczenie, równocześnie stanowią konstrukcję nośną i ochronę przed oddziaływaniami zewnętrznymi: klimatycznymi, atakiem terrorystycznym, uderzeniem spadającego samolotu, itd. Ważne jest również zastosowanie betonu w magazynach materiałów rozszczepialnych i odpadów, a także w osłonach izotopów radioaktywnych w ośrodkach medycznych. W tych wszystkich zastosowaniach, wielostronne zainteresowanie betonem jako materiałem osłonowym jest uzasadnione.

Prace badawcze nad zastosowaniem betonu w budowie obiektów związanych z wytwarzaniem energii jądrowej były rozpoczęte i rozwijane w Polsce jeszcze przed 1970 rokiem 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 budowy reaktorów jądrowych kolejnych generacji i rozszerzania wszystkich innych zastosowań materiałów promieniotwórczych. Tematyka ta nabiera szczególnego znaczenia wobec przyjęcia przez rząd Polski w 2010 r. programu rozwoju energetyki jądrowej<sup>2</sup>, a jest stale aktualna wobec funkcjonowania doświadczalnego reaktora jądrowego

<sup>1</sup>Artykuł stanowi rozwinięcie referatu przedstawionego na Konferencji 'Dni Betonu', Wisła, październik 2012 r.

<sup>2</sup>Ministerstwo Gospodarki „Program Polskiej Energetyki Jądrowej”, projekt 2010 r.

### 1. Introduction

Concrete of various kind is widely applied in construction of nuclear power plants and installations related to radioactive materials as a structural and protective material. Four different scopes of use of concrete may be distinguished: nuclear reactor containment, internal structure, secondary shields and auxiliary building, and auxiliary installations. Concrete structures are used in consecutive safety zones around the reactor core, and also in the main building. Reinforced and prestressed concretes structures protect peoples and environment from all kinds of harmful effects of radiation and cover the reactor against various external actions: climatic agents, terrorist attacks, fall of an airplane, etc. Application of concrete shields in the storages for fission materials and for radioactive waste is also important, as well as in medical centers where radioactive isotopes are used. Radioactive waste is contained in special storages. For all these purposes, concrete is very largely applied as a material for shields against radiation.

Investigations related to the application of concrete in construction of buildings for nuclear reactor plants were initiated and developed in Poland already before 1970 when construction of a nuclear reactor in Żarnowiec was decided and the storage for waste in Różan was built, but since that time the research works are much less intensive. On the contrary, in many countries of the world several directions of research are continued in order to improve the use concrete for all kinds of applications in new generations of nuclear reactors and in other secondary installations. At present, this direction of research is becoming important in Poland, because the government adopted in 2010 the decision of development of the energy based on nuclear fission<sup>2</sup>. The research is carried on in the experimental nuclear reactor 'Maria' in the National Center of Nuclear Research in Świerk, where also radioactive isotopes are produced for therapeutical and industrial applications and scientific

<sup>1</sup>Paper is based on the text presented at the Conference 'Dni Betonu', Wisła, October 2012 and published in the proceedings

<sup>2</sup>Ministry of Economy „Programme of Polish Nuclear Energy”, project 2010.

wego „Maria” w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku, w którym także wytwarzana są materiały radioaktywne, stosowane dla potrzeb badawczych, przemysłowych i leczniczych, a także prowadzone są prace badawcze i szkoleniowe.

Tematem artykułu jest przegląd obecnego stanu wiedzy na temat wykorzystania betonu w tej dziedzinie budownictwa. Przedstawione badania, wyniki i wnioski są ograniczone do roli osłon z betonu podczas normalnej eksploatacji urządzeń i materiałów rozszczepialnych i nie dotyczą poważnych sytuacji awaryjnych. Prawdopodobieństwo takich zdarzeń 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.; tego rodzaju obliczenia oparte są na trudnych do sprawdzenia założeniach i nie są tu analizowane. Również wpływ oddziaływania promieniowania podczas długotrwałej eksploatacji reaktorów jądrowych, który może powodować zmiany różnego rodzaju w składzie i mikrostrukturze betonu w osłonach nie jest tu rozpatrywany i wymaga oddzielnego opracowania.

## 2. Promieniowanie i jego wpływ na organizm człowieka

Promieniowanie jonizujące występuje wszędzie na ziemi. Jest to promieniowanie naturalne, które pochodzi z przestrzeni kosmicznej oraz z pierwiastków promieniotwórczych w gruncie i w materiałach budowlanych. Również ciało człowieka zawiera elementy promieniotwórcze, a dodatkowe dawki promieniowania otrzymuje on podczas niektórych 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 rysunku 1. Takie ilości są traktowane jako poziomy porównawcze w stosunku do innych przyczyn napromieniowania.

Niebezpieczne dawki mogą powstawać w przypadku mniejszych lub większych awarii w elektrowniach jądrowych oraz w składowiskach odpadów radioaktywnych. Również są to miejsca, w których ludzie muszą być chronieni przed skutkami napromieniowania podczas normalnej eksploatacji, ponieważ strumienie neutronów i jonizacja mogą w sposób zasadniczy uszkodzić organizm człowieka. 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.

Procesy zachodzące w materiałach rozszczepialnych powodują powstawanie róż-

research and training are continued. In parallel, research should be developed also in other specialized institutes.

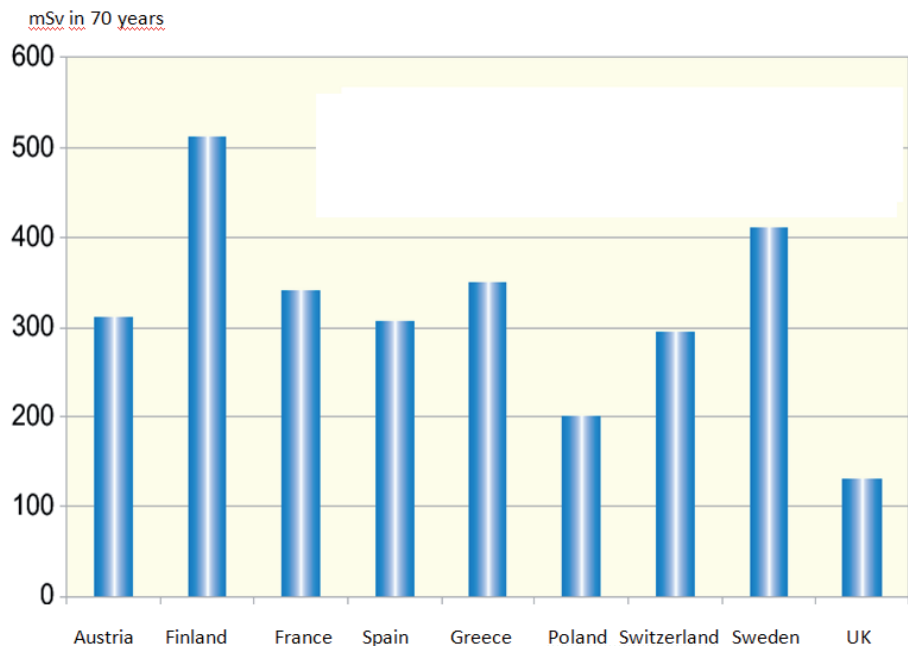
In the paper the present state of knowledge on the application of concrete in that field of building science is presented. The reviewed investigations, test results and conclusions are limited to the role of concrete shields during normal exploitation of installations and storage of fission materials and do not cover serious accidents and disasters. The probability of such an event in a year is estimated as equal to  $1,8 \cdot 10^{-6}$ , which corresponds to one accident during over 1300 years, taking into account the number of nuclear reactors active in 2009; such estimations are based on data that are difficult for any verification and are not considered here. Also the influence of radiation from the nuclear reactors during long term exploitation which may modify concrete microstructure and properties is not considered here and merit special studies.

## 2. Radiation in the life of humans

Ionizing radiation is present everywhere in the earth. This is cosmic radiation from outer space, terrestrial radiation from ground and from building materials. Human body contains radioactive elements also, and we get additional doses of radiation during various medical treatments and tests.

The approximate doses of ionizing radiation absorbed in 70 years of human life are different in various countries and a few average values are indicated in Fig. 1. These values are considered as reference for other sources of radiation.

Dangerous doses of radiation may be absorbed in nuclear power plants and in radioactive waste storages as a result of more or



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

Fig. 1. Average values of radiation from earth absorbed after 70 years of life in a few European countries, after IAEA

tego rodzaju promieniowania, które oddziałuje na warstwy ochronne. Promieniowanie alfa  $\alpha$  i beta  $\beta$  jest mniej przenikliwe i jest zatrzymywane po przejściu przez warstwę powietrza o grubości 25 do 120 mm lub inny ośrodek. Promieniowanie  $\alpha$  może być zatrzymane przez arkusz papieru, a promieniowanie  $\beta$  przez kilka milimetrów aluminium lub szkła organicznego.

Promieniowanie fotonów  $\gamma$  ma naturę fal elektromagnetycznych podobnie jak promienie Roentgena, światło i fale radiowe. Promieniowanie  $\gamma$  jest bardzo przenikliwe i niebezpieczne dla żywych organizmów ponieważ zakłóca procesy biologiczne; zatrzymywane jest dopiero przez odpowiednie warstwy ołowiu lub innych materiałów ciężkich, zawierających pierwiastki o wysokiej liczbie atomowej, a także przez warstwy betonu o znacznej grubości.

Neutrony są cząstkami przenikliwymi, bez ładunku elektrycznego; w odpowiednich warunkach mogą powodować reakcje jądrowe. Neutron nie występuje w przyrodzie, a ich źródłem są reaktory jądrowe lub cyklotrony i inne urządzenia do przyspieszania cząstek. 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 nie powodują jonizacji bezpośrednio, ale na skutek wzajemnego oddziaływania z atomami materiałów, przez które przechodzą, przy czym powstają różne rodzaje promieniowania:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  i X, powodujące jonizację, czyli odrywanie elektronów od atomów w tych materiałach. Strumienie neutronów są rozpraszane i absorbowane przez warstwy różnych materiałów, np. betonu lub parafiny, a także wodę.

### 3. Betonowe osłony przed promieniowaniem

W elektrowniach atomowych budynki, w których znajdują się reaktory, a także instalacje o znaczeniu drugorzędym są otoczone osłonami z różnych materiałów, aby ochronić otoczenie przed skutkami promieniowania przez ich osłabienie 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 ograniczenie skutków awarii. Szczególne znaczenie mają osłony z betonu ze względu na:

- względnie niski koszt wykonania i dostępność składników;
- możliwość wykonania osłon o rozmaitych kształtach;
- spełnianie równocześnie wymagań dotyczących wytrzymałości jak i funkcjonalnych, stawianych konstrukcjom budowlanym.

Przykładem wczesnego stosowania osłon betonowych może być reaktor jądrowy w Windscale w Wielkiej Brytanii, uruchomiony w 1950 r i wykorzystywany do produkcji izotopu  $^{235}\text{U}$  do celów wojskowych. Na rysunku 2 pokazano przekrój ściany osłonowej, której warstwa betonu miała grubość 2,6 m. W 1957 r. nastąpiła w tym reaktorze pierwsza awaria w historii rozwoju energii atomo-

less important accidents. During normal exploitation of nuclear reactors people also should be protected against flux of neutrons and ionizing radiation in order to avoid considerable damages. It is generally considered that the dose absorbed equal to 0.5-1.0 Sv produces durable destructions in the human body and absorption of 4 Sv results in death of 50% of population.

Processes in fission materials produce different kinds of radiation and interact with shielding materials. Particles alpha  $\alpha$  and beta  $\beta$  are less penetrating and are absorbed when traverse air or other media at a distance of 25 to 120 mm. Particles  $\alpha$  can be stopped by a sheet of paper and particles  $\beta$  by a few millimeters of aluminum or organic glass.

Electromagnetic radiation gamma  $\gamma$  is similar to X-rays, light, and radio waves with different wavelength. Gamma radiation is highly penetrating and dangerous and in the case of living tissues it can disturb biological processes. It is better absorbed by materials with high density like lead and other materials with high atomic numbers and by thick layers of concrete.

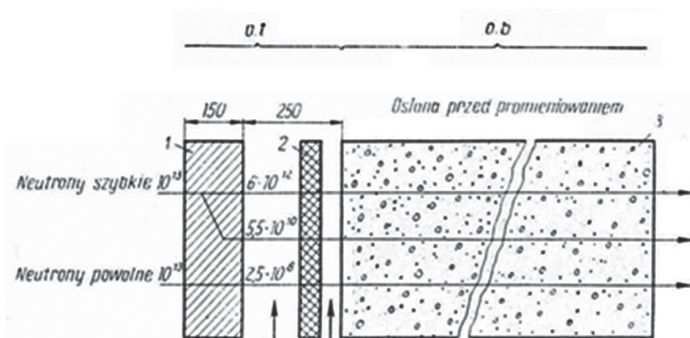
Neutrons are uncharged particles and do not produce ionization directly but their interactions with the atoms of matter create secondary radiation of alpha  $\alpha$ , beta  $\beta$ , X and gamma  $\gamma$  which then produce ionization. Neutrons do not exist in nature but are produced in nuclear reactors, in cyclotrons or other special installations and are highly penetrating; in certain conditions may create nuclear reaction. A few categories of neutrons are distinguished, e.g. fast with energy above 100 keV, thermal with energy appr. 25 meV and epithermal with energy between 0.025 and 10 keV. Flux of neutrons are dispersed and absorbed by the layers of various materials like concrete, paraffin and water.

Neutrons do not cause ionization directly, but because of collisions with atoms of various materials different kinds of radiations are produced:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  and X, which create ionization, i.e. single electrons are separated from atoms. Flux of neutrons are dispersed and absorbed by layers of different materials, like concrete, paraffin and water.

### 3. Concrete shields

In the nuclear power plants the containment buildings that cover reactors, and also other secondary installations are inside the shields made with different materials in order to protect people and environment against all kinds of radiation, it means to attenuate it to the acceptable limits. The forms of the buildings, their structures and applied materials (steel, lead and water in basins, concrete) are designed to reduce the intensity of radiation during normal exploitation, and also to control the situation in the case of an accident of any kind. Particularly important are the concrete shields because of:

- relatively low cost and easily available components;
- possibility to build shields with various required shapes;
- fulfillment of different structural and functional requirements.



Rys. 2. Osłona pierwotna reaktora jądrowego w Windscale; kolejne warstwy to stal, osłona termiczna i beton o grubości 2,6 m, według Pohl (1967)

Fig. 2. Primary shield of nuclear reactor in Windscale (UK); from the reactor Core steel, thermal insulation and concrete of 2.6 m, after Pohl (1967)

wej, a reaktory chłodzone powietrzem w ścianach obudowy nie były później budowane.

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

Wymagania stawiane betonom osłonowym sformułowano w różnych publikacjach, m.in. według Abramowicza i Ciasia (1975) obejmują one:

- jednorodność i wysoką gęstość w celu tłumienia promieniowania;
- dostateczną zawartość wodoru, także przy wzroście temperatury, dotyczy to więc wody krystalizacyjnej, niezależnej od ilości wody zarobowej, określającej współczynnik  $w/c$ ;
- dobre przewodnictwo ciepłe ze względu na konieczność ograniczenia powstających lokalnych naprężeń w podwyższonej temperaturze;
- 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 znajomość tej dziedziny znacznie się poszerzyła. Jednakże ze względu na różnorodność składu mineralnego i właściwości kruszyw, optymalną kompozycję i technologię wykonania betonu osłonowego do określonych celów trzeba w każdym przypadku opracować na podstawie pełnej znajomości stawianych wymagań i dostępnych składników,

Hamowanie promieniowania  $X$  i fotonów  $\gamma$  następuje w warstwach różnych materiałów osłonowych, przy czym grubość osłon może

The nuclear reactor in Windscale (UK) is an example of early application of concrete shields; it was open in 1950 in order to produce isotope  $^{235}\text{U}$  for military applications. In Fig. 2 a cross section of the composite wall is shown where layer of concrete was 2.6 m thick. In 1957 in that reactor a serious accident occurred, first in the history of nuclear energy development. Later, the nuclear reactors with air cooling systems in the walls were never constructed.

Concrete shields have to satisfy several requirements of mechanical strength, tightness and durability, corresponding to a foreseen period of exploitation. The conditions to attenuate neutron flux and  $\gamma$  radiation that penetrate through first shields are also imposed. These two groups of requirements form complex conditions for design and optimization of concrete composition, together with adequate reinforcement and prestressing in order to ensure durability and safety at various accidental situations too.

The requirements for concrete shields were formulated in several published papers, e.g. in the paper by Abramowicz and Cias (1975):

- homogeneity and high density in order to attenuate radiation;
- sufficient content of hydrogen, also maintained at elevated temperature, therefore it concerns crystalline water that is independent on mixing water which determines  $w/c$  coefficient;
- high thermal conductivity in order to reduce possible differences in elevated temperature in the shields and to control local stresses;
- relatively low value of Young modulus;
- adequate strength and durability for structural purposes and exploitation conditions.

These requirements are not basically modified, but after several years of exploitation of nuclear reactors and continued investigations, the present available knowledge in that field is considerably developed. It appears, however, that because of various mineral composition and properties of aggregates and cements, optimal composition and technology for execution of shield concrete should be prepared for each particular case with full information on imposed conditions and on available components.

X-rays and radiation  $\gamma$  are attenuated and absorbed in different layers of shielding materials and thickness of the layers may be reduced using materials with higher density and better properties. That is why the primary shields are made with steel and lead as materials with high density, and with special concretes.

Attenuation of flux of neutrons is complex and high density is not sufficient. Because of the neutrons with different energy and the differences in active cross sections of elements that capture neutrons, different nature of shields is necessary. In order to avoid or at least to reduce the collisions with other atoms and secondary emission of  $\gamma$  radiation, slow neutrons are absorbed by materials with lower density like water, paraffin or polyethylene, and also by hydrogen in concrete itself. This complication is mainly due to that secondary radiation  $\gamma$  which should be also controlled.

być zrekompensovana 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 zawierające specjalne składniki.

Zabezpieczanie przed promieniowaniem neutronowym jest bardziej skomplikowane; nie wystarcza 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  $\gamma$ , 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  $\gamma$ .

Ponieważ w dojrzałym betonie zawartość wodoru wynosi około 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 dużej zawartości wodoru w wodzie krystalizacyjnej [Alexander i Mindess (2005)], oraz zaprojektowanie betonu o dużym upakowaniu kruszywa. Okazało się przy tym w wyniku badań [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  $\gamma$ ; 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.

W akceleratorach różnego rodzaju, np. w cyklotronach, cząstki są przyspieszane do energii w zakresie 100–1000 MeV. Stosowane są osłony o znacznych grubościach z betonów wysokowartościowych, a zmniejszenie grubości osłon uzyskuje się przez zastosowanie specjalnych kruszyw.

Skomplikowane warunki eksploatacji osłon betonowych spowodowały konieczność przeprowadzenia wielu rozmaitych badań, aby określić właściwości betonu i sformułować wymagania dotyczące składu 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, a więc o rozmaitym składzie mineralnym.

Osłony mogą być także budowane z materiałów w postaci sypkiej, umieszczonych w pojemnikach stalowych. Takie rozwiązanie opisane jest w pracy Calzada i in. (2011). Pojemniki ze sproszkowanym hematytem, kolemanitem i innymi materiałami, zatrzymującymi promieniowanie  $\gamma$  i neutronowe mogą być ustawiane w od-

In the hardened concrete there is only appr. 0.25% of hydrogen by mass, and in order to slow down neutrons at least 0.45 – 0.5% is necessary. Then, special aggregates should be used with high hydrogen content, Alexander and Mindess (2005), and dense packing of aggregate grains. It appeared also after test results published by Kharita et al. (2010) that mixing water considered in  $w/c$  coefficient does not influence seriously the possibility of concrete to absorb neutrons neither  $\gamma$  radiation. These tests were performed on sandstone aggregate with  $w/c$  variable from 0.42 to 0.63. Therefore, it is necessary to introduce hydrogen into concrete as the crystalline water in special aggregates.

In the installations of cyclotrone, type the particles are accelerated to high energies of 100 – 1000 MeV and there also thick walls made with high performance concrete are used. Application of special aggregates may allow reducing the wall thickness.

Very complex conditions imposed on concrete shields are the reason of several different investigations realized during last years, aimed at determination of optimal properties of concrete and at formulation of requirements addressed to concrete components, mix proportions and design of concrete structures. This does not mean that all phenomena in shield concretes are fully understood in a qualitative, and particularly in a quantitative way. One of the reasons is that the most important concrete properties depend on the aggregates mostly found in local deposits and with various mineralogical composition.

The shields may be also constructed with granular materials prepared in steel containers. Such a solution was described by Calzada et al. (2011). The containers with granulated hematite, colemanite or other materials that absorb or attenuate  $\gamma$  radiation and stream of neutrons can be appropriately situated around sources of radiation or cover personnel compartments. Even with higher cost of such equipment with respect to permanent walls that solution may be interesting; there is no information on practical applications.

## 4. Properties of concrete for shields

### 4.1. Material composition and microstructure

Already in the first edition of the book by Neville (1963) recommendations related to the design of concrete for shields were published. Kaplan presented in (1989) actual state of knowledge on concrete in walls and slabs that should protect people and environment against streams of neutrons and  $\gamma$  radiation. These requirements are basically valid also at present. However, investigations realized recently bring the results that are very much important at present, because first nuclear power plants were designed for 40 years of exploitation but now quite often extensions of that period are considered and 60 years is usually assumed for new investments.

Because the concrete walls and slabs are usually rather thick, high compressive strength is not necessary and the basic problem is how to modify concrete composition to enhance its tightness

Tablica 1 / Table 1

RODZAJE KRUSZYW W BETONACH OSŁONOWYCH, WEDŁUG MINDESSA I IN. (2003)

AGGREGATES IN CONCRETE SHIELDS, AFTER MINDESS ET AL. (2003)

Naturalne kruszywa	Gęstość, kg/m <sup>3</sup> (przybliżona)	Skuteczność osłony	Sztuczne kruszywa	Gęstość, kg/m <sup>3</sup> (przybliżona)	Skuteczność osłony
boksyt	2000	prędkie neutrony (H)	ciężki żużel	5000	promieniowanie $\gamma$
serpentyń	2500		fosfor Ferro	6000	
goetyt	3500		Żelazokrzem	6700	
limonit	3500		stalowe opiłki	7500	
borokalcyt	2500	neutrony (B)	Ferroboryt	5000	neutrony (B)
kolemanit	2500		węglík boru	2500	
baryty	4200	promieniowanie $\gamma$	stopiony bor	2500	
magnetyt	4500				
ilmenit	4500				
hematyt	4500				

(H) – działanie wodoru

(B) – działanie boru

powiednich miejscach wokół źródeł promieniowania lub pomieszczeń dla personelu. Nawet przy wzroście kosztu tego rozwiązania w porównaniu do stałych osłon betonowych, wskazano na korzyści; jednak brak informacji o szerszym stosowaniu takich rozwiązań.

## 4. Właściwości betonu w konstrukcjach osłonowych

### 4.1. Składniki i mikrostruktura

Wskazówki do projektowania betonów osłonowych można znaleźć już w pierwszym wydaniu książki Neville'a (1963), a w roku 1989 Kaplan (1989) przedstawił stan wiedzy o projektowaniu betonu w ścianach i płytach, stanowiących osłony personelu i otoczenia przed działaniem neutronów i promieniowania  $\gamma$ ; podstawowe wymagania są aktualne również obecnie. Jednak nowsze badania przynoszą wiadomości obecnie niezbędne, ponieważ o ile dawniej budowano reaktory jądrowe z perspektywą ich eksploatacji w ciągu 40 lat, to obecnie najczęściej przewiduje się sześćdziesięcioletni okres.

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 i spowalniania różnego rodzaju promieniowanie i strumienie neutronów. 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 tabelicy 1 podane są przykłady specjalnych kruszyw i ich wpływu na właściwości osłonowe betonu.

and durability. The protecting properties are related mostly to the aggregate that cover usually over 70% of concrete volume. That is why special aggregates are used with increased ability to absorb and to attenuate various kinds of radiation and streams of neutrons. Different kinds of iron ore, e.g. hematite and magnetite are applied, and also metallurgical wastes. These materials are less expensive than materials with high density like lead, steel or depleted uranium, that are usually reserved for direct shield of the nuclear reactor core. In Table 1 examples are shown of special aggregates and their influence on protecting properties of concrete.

The containers for radioactive low- to high-level waste are precast with concrete that has to ensure durability, often polymer concrete or fibre reinforced concrete are used, sometimes there are metallic containers made with carbon steel or copper. The containers are stored in underground tunnels and vaults, e.g. in old mines, also within concrete walls, Bennett and Gens (2008). The situation of such a storage should exclude any leakage, tectonic movements and influence of underground water for appropriate period of time.

### 4.2. Concrete with boron aggregates

Natural aggregates containing compounds of boron (B) absorb neutrons and  $\gamma$  radiation thanks to relatively high content of hydrogen. These minerals are:

- Colemanite  $2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  is a calcium borate, with hardness between 4 and 4.5, density appr.  $2.41 \text{ g/cm}^3$ , with 51% content of pure  $\text{B}_2\text{O}_3$ .
- Tincal  $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$  is a sodium borate (borax), with hardness 2 – 2.5.
- Ulexit ( $\text{NaCa}[\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_6] \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ ) is a calcium borate sodium hydroxide, also with hardness 2 – 2.5 and with fibrous structure.

Colemanite is used most frequently. These minerals are applied in the form of partial replacement of conventional aggregate in concrete in order to reduce thickness of concrete shields.

Pojemniki na odpady o różnym stopniu radioaktywności wykonywane są z betonu, odpowiadającego wymaganiom długotrwałości, niekiedy z polimerobetonu i fibrobetonu, albo metalowe: ze stali węglowej lub miedzi. Pojemniki takie umieszcza się w podziemnych komorach, np. w starych wyrobiskach kopalnianych, również w obudowie betonowej [Bennett i Gens (2008)]. Lokalizacja składowisk powinna je zabezpieczać przez odpowiedni okres czasu od przeciekania i wszelkich szkodliwych czynników zewnętrznych takich, jak ruchy tektoniczne i wpływ wód podziemnych.

#### 4.2. Beton z kruszywem zawierającym bor

Kruszywa naturalne zawierające związki boru powodują zatrzymanie neutronów, dzięki dużej zawartości wodoru, a także hamują promieniowanie  $\gamma$ . 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.  $2,41 \text{ g/cm}^3$ , zawiera 51%  $\text{B}_2\text{O}_3$ ;
- tynkal, uwodniony boran sodu, boraks,  $(\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O})$ , o twardości 2-2,5;
- ulexit, uwodniony boran sodowo wapniowy,  $(\text{NaCa}[\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_6] \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ , także o twardości 2-2,5 i budowie włóknistej.

Pierwszy z wymienionych jest najczęściej używany. Minerale te są stosowane zastępując częściowo zwykłe kruszywo w betonach w celu zmniejszenia grubości osłon.

Badania przeprowadzone przez Korkuta i in. (2012) na próbkach tych minerałów o grubości około 15 mm i poddanych bezpośrednio działaniu strumienia prędkich neutronów potwierdziły największą efektywność kolemanitu (tablica 2). Kolemanit jest stosowany jako częściowe zastąpienie zwykłego kruszywa w betonie. W Polsce nie występują złoża minerałów, zawierających bor.

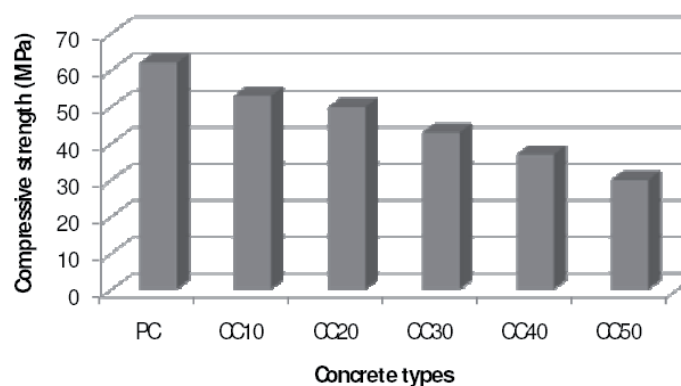
Szczegółowe opisy zastosowania kolemanitu można znaleźć w publikacjach kilku autorów. Betony z kruszywem z piaskowca, zastąpionym w ilości 10 – 50% przez kolemanit badali Gencel i in. (2010). Wyniki wskazały, że kolemanit powoduje pogorszenie wszystkich właściwości mechanicznych proporcjonalnie do zastosowanej ilości, co widać na rysunku 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

Tablica 2 / Table 2

WARTOŚCI HVL OKREŚLONE NA PRÓBKACH RUD BORU, KORKUT I IN. (2012)

VALUES OF HVL DETERMINED ON SPECIMENS OF BORON ORE, AFTER KORKUT ET AL. (2012)

Materiał osłony	Wartość HVL, mm	Uwagi
Wosk parafinowy	39,6	wg Desdin i Ceballos (2000)
Wosk parafinowy	$35,2 \pm 0,0085$	wg kodu FLUKA
kolemanit	$32,8 \pm 3,28$	
ulexit	$39,8 \pm 3,98$	
tynkal	$48,7 \pm 4,87$	



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

Fig. 3. Compressive strength of concrete as function of replacement of ordinary aggregate by colemanite from 0 to 50%, Gencel et al. (2010)

Tests executed by Korkut et al. (2012) on the specimens of these minerals with 15 mm depth and subjected directly to flux of speed neutrons, confirmed the highest efficiency of colemanite, Table 2. This mineral is used as partly replacement of ordinary aggregate in concrete. In Poland there are no deposits of minerals with boron.

Detailed descriptions of application of colemanite are in several papers. Concrete with partial replacement of sandstone aggregate with 10 – 50% of colemanite was tested by Gencel et al. (2010). Their results indicate that colemanite resulted in worsening of all mechanical properties of concrete, proportional to its mass percentage, as shown in Fig. 3 for compressive strength. The workability of the mix was also becoming difficult and limitation of colemanite to 30% was advised. Yarar (1996) proposed to limit colemanite replacement down to 10%.

Mortazavi et al. (2010) applied two additions together as partly replacement of ordinary aggregate and obtained a special kind of concrete denoted as CoGa (*ColemaniteGalena*) with the following composition: lead ore (galena) 3.548 kg, colemanite 0.896 kg, water 0.608 l, cement 0.95 kg, microsilica 0.095 kg and w/c = 0.58. Density of that material was  $4100 - 4650 \text{ kg/m}^3$  and compressive strength 39.8 – 46.4 MPa. Characteristic HVL<sup>3</sup> was 24.9 mm with respect to 60 mm for reference concrete with density of  $2350 \text{ kg/m}^3$  that was made with ordinary aggregate. The attenuation of neutron streams in CoGa concrete was higher by 10 %.

Application of boron compounds was investigated also by Kharita et al. (2011) using them as admixtures to the concrete mix but two compounds were found to be ineffective (boric acid and boron frit) while the borax disturbed considerably the hardening of cement. Only borax admixture of 0.5% concrete mass together with ordinary dolomite and calcite aggregate ensured attenuation of  $\gamma$  radiation better by 80% in the walls of 1.0 m thickness or more, without any effect on the shielding efficiency against neutrons. No influence of such addition on concrete setting and strength was observed.

<sup>3</sup>The thickness of any given material that reduces radiation by 50% is known as the half-value layer (HVL), for 10% transmission notation TVL is applied.

i odpowiednie zrównoważenie pogorszenia właściwości mechanicznych; Yarar (1996) zalecał jednak 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 – 4650 kg/m<sup>3</sup>, wytrzymałość na ścislenie 39,8-46,4 MPa. Charakterystyczną wartością HVL<sup>3</sup> takiego betonu określono na próbkę o grubości 24,9 mm w porównaniu do 60 mm w przypadku betonu porównawczego o gęstości 2350 kg/m<sup>3</sup> ze zwykłego kruszywa; osłabienie strumienia neutronów w betonie CoGa było większe o 10%.

Zastosowanie związków boru jako domieszki do betonu badał również Kharita i in. (2011) jako domieszki do betonu, przy czym kwas borny i spieki boru nie miały wpływu, natomiast boraks hamował twardnienie betonu. Jedynie dodawany w ilości 0,5% masy betonu ze zwykłym kruszywem dolomitowym i wapiennym powodował zatrzymywanie promieniowania  $\gamma$  w ścianach o grubości co najmniej około 1,0 m, przy czym o 80% skuteczniej w porównaniu ze zwykłym betonem, natomiast dodatek boraksu nie wpływał na osłanianie przed strumieniem neutronów. Nie stwierdzono wpływu takiego dodatku na hydratację cementu i wytrzymałość betonu.

### 4.3. Betony ciężkie

Powiększając gęstość kruszywa stosowanego w betonie można uzyskać różne rodzaje betonów ciężkich, w których następuje spowolnienie strumieni neutronów. Ciężkie pierwiastki w kruszywie spowalniają prędkie neutrony o energii do 10 meV, neutrony o energii większej od 100 keV wymagają obecności wodoru, co jest potrzebne także w celu absorpcji powolnych neutronów o energii przekraczającej 100 eV. Spowalnianie prędkich neutronów odbywa się dzięki sprężystym i niesprężystym zderzeniom, a także przez nieliczne przechwytywanie neutronów o wysokich energiach. Powolne neutrony mogą być łatwiej zatrzymane. W celu spowolnienia neutronów są stosowane kruszywa zawierające wodór np. serpentyn i limonit, zawierający wodór w wodzie krystalizacyjnej. Jeżeli natomiast trzeba zatrzymać promieniowanie  $\gamma$ , to wskazane są specjalne ciężkie kruszywa oraz odłamki żelazne lub ścinki stalowe, a także żużel z wytopu stali.

Naturalne kruszywa ciężkie naturalne to przede wszystkim baryt (szpat ciężki, siarczan baru BaSO<sub>4</sub>), a także rudy żelaza: hematyt, magnetyt, limonit i ilmenit. Zawartość odpowiednich pierwiastków w kruszywie pozwala na zmniejszanie grubości warstw betonu, przy zachowaniu właściwości mechanicznych. Szczegółowe badania, wyniki pomiarów doświadczalnych i empiryczne wzory, wskazujące na możliwość redukcji grubości osłon z betonów specjalnych, opublikowali Bashter i in. (1996 i 1996a). Kompozycję betonu z kruszywem hematytowym o gęstości 2300-2500 kg/m<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Grubość warstwy materiału, która przepuszcza 50% promieniowania jest oznaczana przez HVL; przez TVL oznaczają się grubość warstwy materiału, przepuszczającą 10% promieniowania.

### 4.3. Heavy weight concretes

Heavy weight concretes are produced using various kinds of aggregate with high density in order to attenuate flux of neutrons. Heavy elements in the aggregate slow down fast neutrons with energy up to 10 meV, while neutrons with energy above 100 keV require hydrogen, that is also needed to absorb slow neutrons with energy above 100 eV. Attenuation of fast neutrons is realized through their elastic and inelastic collisions, and also by infrequent capture of neutrons with high energies. Slow neutrons are easier to be stopped. To slow down neutrons aggregates including hydrogen are applied, e.g. serpentine and limonite containing hydrogen in crystalline water. When  $\gamma$  radiation should be attenuated, then special heavy aggregates are used and iron and steel scrap, also metallurgical slag.

Natural heavy aggregates containing barite (heavy spar, barium sulphate BaSO<sub>4</sub>) and also iron ores like hematite, magnetite, limonite and ilmenite are used. With such aggregates the concrete shield may be thinner, provided that adequate mechanical properties are ensured. Detailed results of investigations and test results, completed by empirical formulae indicating possible reduction of dimensions, are given in papers by Bashter et al. (1996 and 1996a). Mix composition for concrete with hematite aggregate (density 2300 – 2500 kg/m<sup>3</sup>) is described by Beushausen and Alexander (2003).

In the design of mix proportions necessary workability should be ensured as well as appropriate resistance against damage from elevated temperature. Barite aggregates do not support high temperature because their thermal expansion is related to directions and is different with respect to cement paste. Thermal expansion coefficient of barite concrete is two times higher than of ordinary concrete. Therefore, barite concrete should not be used over 80°C (certain authors allow 100°C); limonite concrete may be accepted for 200°C. Heavy concretes should be designed taking into account their increased demand of water, appearance of dust when mixing, and possible slower hydration. It is always advised to prepare test mixing in order to determine adequate mix proportions and all technological operations in actual conditions.

Various kinds of aggregate from local deposits were tested by Kharita et al. (2008), who concluded excellent efficiency of hematite ore for shields against both flux of neutrons and  $\gamma$  radiation.

Barite (BaSO<sub>4</sub>) deposits are in small quantities in many places on earth, also in Poland, in the form of three fractions 0-4; 0-6 and 6-32 mm, with average density of approx. 3800 kg/m<sup>3</sup>. After tests published by Ablewicz and Dubrawski (1986) the compressive strength of barite concrete was between 16 and 40 MPa and its tensile strength at splitting was about 10% of these values; thermal expansion was also determined.

Investigations published by Akhurt et al. (2006) proved the efficiency of barite fine and coarse aggregate as a partial replacement for ordinary aggregate. After tests, the linear attenuation coefficient



i technologię jego przygotowania opisali szczegółowo Beushausen i Alexander (2003).

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 ułożenia kryształów, różniącą się znacznie od zaczynu cementowego. Współczynnik rozszerzalności liniowej betonu barytowego jest dwukrotnie większy niż betonu zwykłego. Nie jest więc zalecane stosowanie betonu barytowego w temperaturze przekraczającej 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  $\gamma$ .

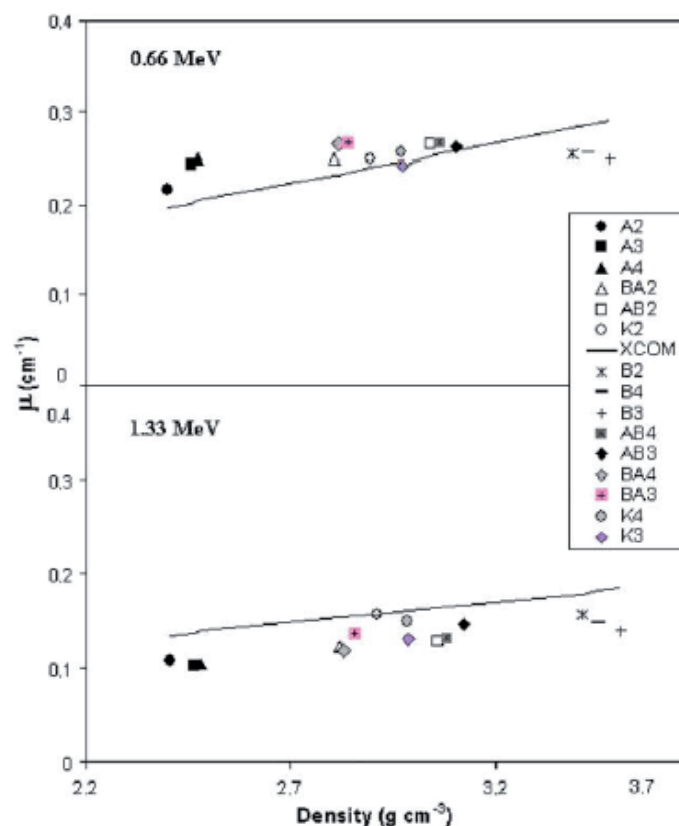
Baryt występuje w niewielkich ilościach na kuli ziemskiej w wielu miejscach, także w Polsce, i tu dostępny jest w postaci trzech frakcji 0-4; 0-6 i 6-32 mm, przy średniej gęstości ok. 3800 kg/m<sup>3</sup>. Według badań publikowanych w pracy Ablewicza i Dubrawskiego (1986) uzyskiwano wytrzymałość betonu z kruszywem barytowym na ściskanie w zakresie 16–40 MPa i na rozciąganie przy rozłupywaniu ok. 10% tych wartości; określano także współczynnik rozszerzalności termicznej.

Badania prowadzone przez Akhurt i in. (2006) wykazały skuteczność stosowania drobnego i grubego ruszywa barytowego, którym częściowo zastępowano kruszywo zwykłe. Wyznaczyli oni wartość  $\mu$  liniowego współczynnika tłumienia promieniowania w przypadku różnych betonów, charakteryzujące ich zdolność do zatrzymywania promieniowania. Wartości  $\mu$  wyliczono ze wzoru Lamberta:

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad [1]$$

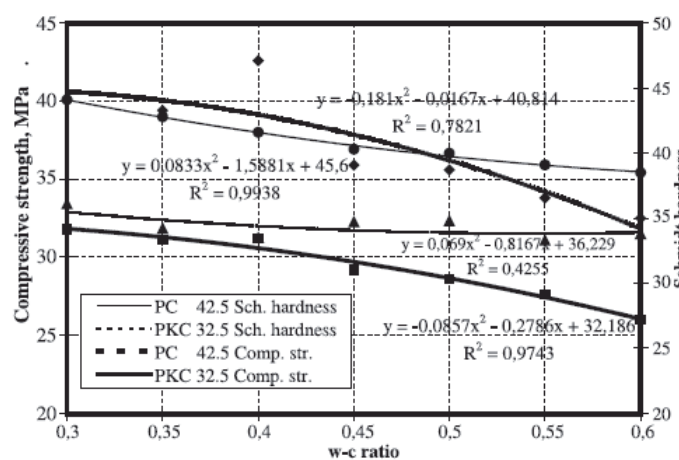
w którym  $x$  jest grubością przeszkody,  $N$  i  $N_0$  oznaczają intensywności promieniowania (liczbę zdarzeń zarejestrowanych przez detektor) po przejściu przez przeszkodę i trafiającego na przeszkodę, odpowiednio.  $N$  i  $N_0$  są określane w trzech kierunkach, uwzględniając przy tym zmienność statystyczną pomiarów. Zdolność zatrzymywania promieniowania zgodnie z tą zależnością rośnie wraz z grubością warstwy i z wartością współczynnika  $\mu$ . Wyniki uzyskane przy dwóch różnych energiach promieniowania: 0,66 meV i 1,33 meV i rozmaitego składu betonu pokazano na rysunku 4. Okazało się, że zwykłe betony o w/c od 0,43 do 0,65 zatrzymywały mniej promieniowania niż betony o różnych proporcjach kruszywa barytowego i zwykłego albo wykonane z samego kruszywa barytowego.

Wartość HVL jest odwrotnie proporcjonalna do współczynnika tłumienia. Jeżeli przyjąć jako jednostkę ilość dostarczonej energii



Rys. 4. Zależność  $\mu$  - liniowego współczynnika tłumienia promieniowania przy różnych energiach promieniowania od gęstości betonu; wyniki odnoszące się do betonów zwykłych pokazano w kółkach, Akhurt i in. (2006)

Fig. 4. Linear coefficient of attenuation of radiation  $\mu$  as function of concrete density for different energies; values for ordinary concretes are shown in circles, Akhurt i in. (2006)



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

Fig. 5. Compressive strength and Schmidt hardness of concretes with barite aggregate and different cement quality as functions of w/c, Topçu (2003)

$\mu$  of radiation  $\gamma$  for different concretes was determined. Values of  $\mu$  were obtained by Lambert's law

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad [1]$$

here  $x$  is the specimen thickness,  $N$  and  $N_0$  are the number of counts recorded in the detector with and without the shielding

promieniowania, a energię przechodzącą przez przeszkodę jako 0,5, to korzystając z równania [1] można napisać:

$$0,5 = 1,0 e^{-\mu x}$$

Stąd:

$$0.5 = 1.0 e^{-\mu x} \quad \text{i} \quad x_{0,5} = \text{HVL} = 0.693/\mu \quad [2]$$

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

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

Akhurt i in. (2010) sprawdzali skuteczność zeolitu jako kruszywa w betonach osłonowych, ale uzyskali negatywny wynik, a współczynnik  $\mu$  malał wraz z zawartością zeolitu w kruszywie.

Podstawowe właściwości mechaniczne betonu o gęstości ok. 4000 kg/m<sup>3</sup>, z kruszywem barytowym wyznaczył Topçu (2003) stosując dwa rodzaje cementu portlandzkiego o klasach (PKC 32,5 i PC 42,5) w ilości 350 kg/m<sup>3</sup>, przy różnych wartościach  $w/c$ , z kruszywem barytowym o rozmiarach ziaren od 0,5 do 16 mm. Na rysunku 5 pokazano wytrzymałość na ściskanie i twardość Schmidta jako funkcję  $w/c$ . 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 liniowego współczynnika spowolnienia neutronów określono z dwóch zależności:

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

tu  $c$  oznacza procentowy udział barytu w kruszywie, a  $d$  jest gęstością betonu w kg/dm<sup>3</sup>. Stwierdzono przy tym, że współczynnik rozszerzalności termicznej jest dwukrotnie wyższy niż w betonie zwykłym, a przewodność cieplna jest niższa. Przeprowadzone badania przyniosły interesujące wnioski odnoszące się do technologii betonów barytowych.

Mechaniczne właściwości betonu z kruszywem barytowym (o zawartości BaSO<sub>4</sub> 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 kg/m<sup>3</sup>, 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 zastąpionym kruszywem zwykłym przez rudę hematytową (od 0 do 60%) badał Gencel (2011). Twardość hematytu, jego wytrzymałość i inne właściwości były zmienne; ruda była kruszona i podzielona na dwie frakcje: drobną i grubą, o gęstości 4180 i 4290 kg/m<sup>3</sup>, a zawartość cementu zmieniała się od 300 do 450 kg/m<sup>3</sup>. Wytrzymałość betonu na ściskanie wzrastała z ilością hematytu i cementu (rys. 6), również rosła wytrzymałość na rozciąganie przez rozłupywanie. Poprawa właściwości mechanicznych była to spowodowana dużą gęstością hematytu i dobrą przyczepnością do zaczynu cementowego. Wyniki badania uzasadni-

targets, respectively.  $N$  and  $N_0$  are determined in three directions, taking into account statistic variation of measurements. According to that relation, the ability to attenuate  $\gamma$  radiation is increased with the shield depth and with the value of linear attenuation coefficient  $\mu$ . The results obtained for two energies of radiation 0.66 meV and 1.33 meV and for different concrete compositions are presented in Fig. 4. It was proved that ordinary concretes with  $w/c$  from 0.43 to 0.65 retained considerably less radiation than concretes made with various proportions of barite and ordinary aggregate or with barite aggregate only.

Value of HVL is inversely proportional to the coefficient of attenuation. When the amount of radiation energy before shield is considered as 1.0, and the energy after shield is 0.5, then from (1) it is

$$0.5 = 1.0 e^{-\mu x} \quad \text{and} \quad x_{0,5} = \text{HVL} = 0.693/\mu \quad [2]$$

From this equation, and assuming linear relation, it is possible to determine the depth of the shield in order to reduce the radiation intensity, e.g. down to 1%

$$x_{0,01} = \ln 0.01 / \mu = 4.60 / \mu.$$

Akhurt et al. (2010) verified the efficiency of zeolites as aggregate for shield concrete but obtained negative results. The  $\mu$  coefficient decreased with the proportion of zeolites in the aggregate.

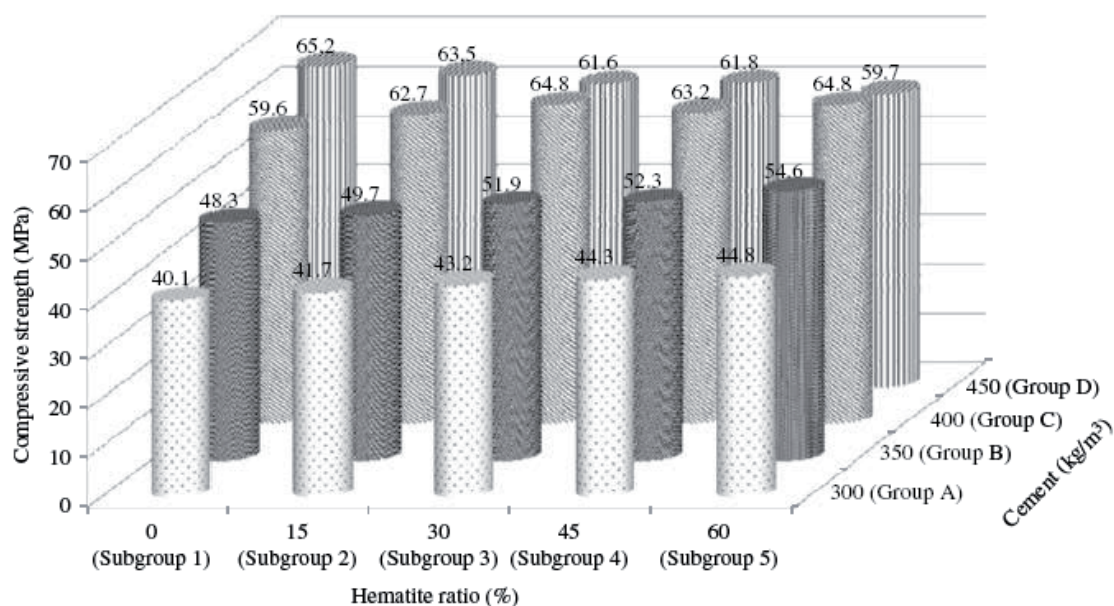
Basic mechanical properties of concrete with density appr. 4000 kg/m<sup>3</sup> and with barite aggregate were determined by Topçu (2003), using 350 kg/m<sup>3</sup> of two kinds of cement (PKC 32.5 i PC 42.5), different values of  $w/c$  and barite aggregate with grains from 0.5 to 16 mm. In Fig. 5 the values of compressive strength and Schmidt hardness are shown. It appears that the hardness is less dependent on  $w/c$ , and the values of Young modulus are closely related to the kinds of barite aggregate, obtained from different regions. Values of linear attenuation coefficient for neutrons were determined from two relations:

$$\mu = 0.055 e^{1.36 c} \quad \text{and} \quad \mu = 0.006 e^{1.04 d}$$

here  $c$  is the percentage of barite in aggregate, and  $d$  concrete density in kg/dm<sup>3</sup>. It was concluded from these tests that the coefficient of thermal expansion was two times higher than in ordinary concrete and the thermal conductivity was lower. The reported investigations supplied also interesting technological conclusions related to barite concretes.

Mechanical properties of concrete with barite aggregate (with BaSO<sub>4</sub> content of 90%) were tested also by Kilincarslan et al. (2006) with this aggregate from 0 to 100%. Density of barite concrete reached 3400 kg/m<sup>3</sup> and also Young modulus was increasing, but the influence of barite aggregate on speed of ultrasounds and on Schmidt hardness was not important. On the contrary, decisive influence of  $w/c$  was observed and after these authors the addition of barite does not influence the durability of concrete.

Concrete with partial replacement of ordinary aggregate (from 0 to 60%) with hematite ore was tested by Gencel (2011). Hematite



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

Fig. 6. Compressive strength of concrete with hematite aggregate as function of cement content and percentage of hematite in aggregate, Gencel (2011)

ły pozytywną ocenę hematytu jako kruszywa w betonach osłonowych. W innej publikacji z tego samego roku Gencel i in. (2011) nie stwierdzili wpływu hematytu na spowolnienie neutronów, natomiast zauważono poprawę ochrony przed promieniowaniem γ dzięki wyraźnemu powiększeniu gęstości betonu, widocznemu na rysunku 7. Analizowano wytrzymałość na ściskanie jako funkcję dwóch zmiennych i otrzymano następujące równanie regresji:

$$f_{cs} = 0.14056 C + 0.04233 H + 0.91, \text{ przy } R^2 = 0.85$$

gdzie C i H oznaczają ilości cementu i hematytu wyrażone w  $\text{kg/m}^3$ .

Wytrzymałość na rozłupywanie betonu hematytowego była wyższa niż zwykłego według zaproponowanego wzoru

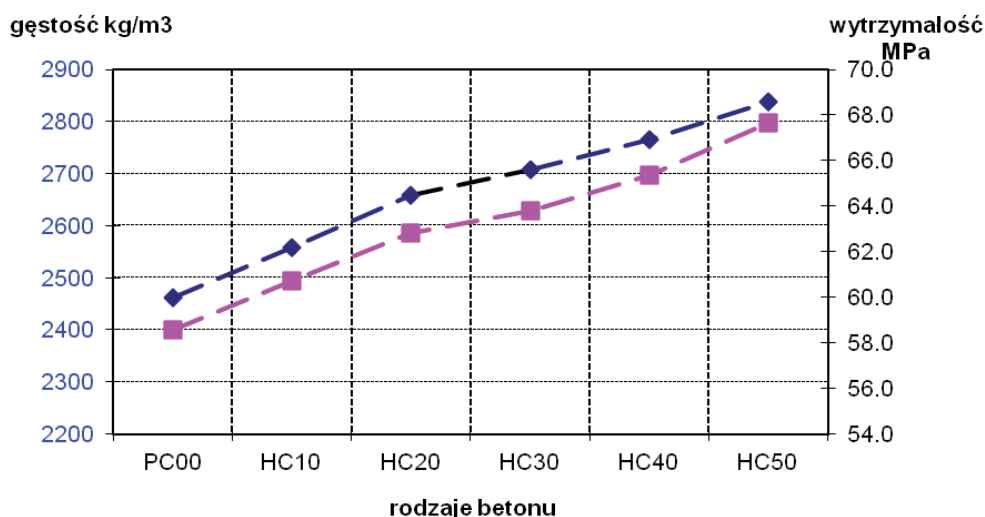
$$f_{spl} = 0.43 (f_{cs})^{0.63},$$

przy współczynniku determinacji  $R^2 = 0,942$ .

Duża gęstość hematytu i jego dobra przyczepność do matrycy cementowej spowodowały bardzo dobre właściwości mechaniczne betonu hematytowego, który może być uważany jako dobry materiał do osłon przed promieniowaniem.

Doświadczenia przeprowadzone przez Kharita i in. (2008) miały na celu porównanie własności osłonowych betonu z hematytom i betonów z innymi kruszywami, dostępnymi lokalnie i z pewnością znacznie tańszymi. Wyniki wykazały bezspornie, że beton z kru-

was characterized by variability of its hardness and strength. Hematite ore was crushed and divided into two fractions, fine and coarse, with densities 4180 and 4290  $\text{kg/m}^3$ , and cement content in concrete varied between 300 to 450  $\text{kg/m}^3$ . Concrete compressive strength increased with the hematite and cement contents, Fig. 6, also tensile strength by splitting was increasing. Improvement of mechanical properties was caused by high density of hematite and its good bond to cement paste. In other paper by Gencel et al. (2011) no influence of hematite on attenuation of neutrons was observed, but the protection against  $\gamma$  radiation was improved thanks to increased density of concrete, as shown in Fig. 7. The compressive strength as a function of these two variables and after multiple regression analysis following formula was proposed:



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

Fig. 7. Density and compressive strength of concrete as functions of hematite ore content in aggregate from 0 to 50%, after Gencel et al. (2011)

Tablica 3 / Table 3

LINEAR ATTENUATION COEFFICIENT, HVL AND TVL1 FOR CONCRETE SAMPLES WITH DIFFERENT AGGREGATES, APPLICATION OF CO-60 GAMMA RAYS, AFTER KHARITA (2008)

Aggregate	Linear attenuation coefficient, cm <sup>-1</sup>	HVL, cm	TVL, cm
natural river, washed a. cleaned	0.133	5.21	17.31
hematite	0.160	4.33	14.39
hematite + black coastal sand	0.155	4.47	14.86
dolomite	0.144	4.81	15.99
serpentine	0.124	5.59	18.57
serpentine + black coastal sand	0.131	5.29	17.58

<sup>1</sup> HVL and TVL: thickness which gives half and tenth of the intensity, respectively

szywym hematytowym zapewniał znacznie lepszą osłonę; przykłady pokazano w tablicy 3.

Badania przeprowadzone przez Ochbelagh i in. (2011) dotyczyły betonu z dodatkiem proszku ołowianego, przy czym stosunek masy proszku do cementu wynosił 0,9. Uzyskano interesujące wyniki: przy tej proporcji wytrzymałość na ściskanie była najwyższa, a także nastąpiła poprawa skuteczności osłony przed promieniowaniem  $\gamma$ .

Badania opisane ostatnio przez Mostofinejad i in. (2012) pozwoliły na uzyskanie zależności między współczynnikiem tłumienia promieniowania  $\mu$  a grubością osłony betonowej  $x$  [mm], przy czym wyniki doświadczalne i obliczeniowe były zgodne. Stosując zależność [1] w postaci

$$\ln(N_0/N) = \mu \cdot x,$$

można je w przybliżeniu przedstawić następująco:

w przypadku zwykłych betonów  $\mu = 0,01408x$

w przypadku betonów z kruszywem barytowym  $\mu = 0,0187x$ .

Wyniki przedstawiono na rysunkach 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  $w/s$  lub dodanie pyłów krzemionkowych, prowadzą do proporcjonalnego pogorszenia właściwości osłonowych betonu, a więc współczynnika  $\mu$ .

Jako ciężkie kruszywa sztuczne stosuje się także stalowy śrut, ścinki, żelrudę lub pył i piasek ołowiany, jednak takie kruszywa powiększają znacznie koszt i utrudniają wykonanie betonu ze względu na możliwość segregacji mieszanki. Według Ablewicz i Dubrowskiego (1986) w osłonach reaktora badawczego EWA w Świerku zastosowano beton o gęstości 2600 kg/m<sup>3</sup> z kruszywem limonitowym i złomem żelaznym, przy czym grubość warstw HVL określono na 80 mm i 64 mm odpowiednio ze względu na neutrony prędkie i termiczne.

Badania przeprowadzone przez Assano i in. (2011) wskazały na skuteczność stosowania dwóch rodzajów betonów ciężkich z kru-

$$f_{cs} = 0.14056 C + 0.04233 H + 0.91, \text{ with } R^2 = 0.85$$

where C and H are cement and hematite contents expressed in kg/m<sup>3</sup>.

The splitting strength of hematite concrete was higher than for ordinary concrete and it was expressed as follows

$$f_{spl} = 0.43 (f_{cs})^{0.63}, \text{ with a strong correlation expressed by } R = 0.942.$$

High density of hematite and its increased bond to cement matrix caused good mechanical properties of hematite concrete. It appeared from this investigations that hematite concrete may be used as an excellent material for shields against radiation.

In experimental tests executed by Kharita et al. (2008) the aim was to compare attenuation property of concretes with hematite and with other locally available and certainly less expensive aggregate. The results have shown clearly that concrete with hematite aggregate gave the most efficient shielding; examples of results are presented in Table 3.

Investigations realized by Ochbelagh et al. (2011) concerned concrete with addition of lead used as powder; the proportion between lead and cement was 0.9:1.0. The results were interesting: not only the compressive strength of specimens was maximum at that proportion but also shielding against  $\gamma$  radiation was intensified.

Recently, Mostofinejad et al. (2012) conducted series of tests that permitted to obtain relations between linear attenuation coefficient  $\mu$  and depth of concrete shield  $x$  [mm], and the calculated results were in agreement with experimental ones. Using relation (1) in the form

$$\ln(N_0/N) = \mu \cdot x,$$

the approximate relations are derived:

for ordinary concretes  $\mu = 0.01408x$ ,

for concretes with barite aggregate  $\mu = 0.0187x$ ,

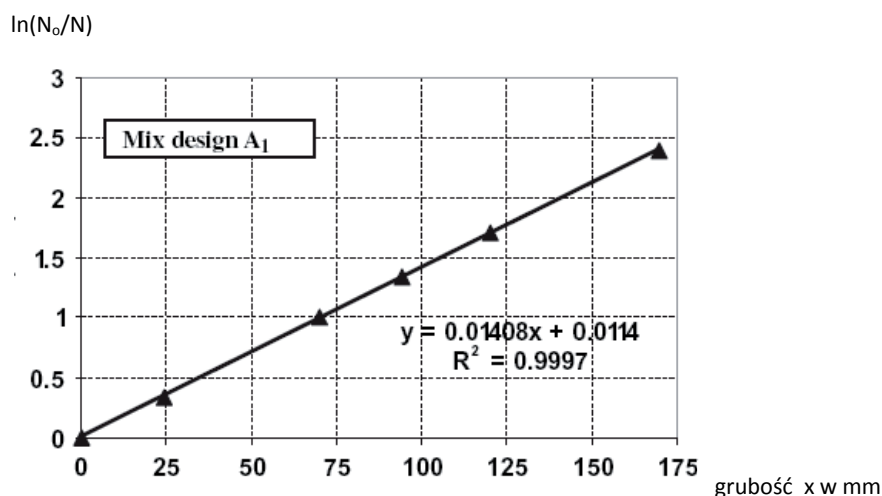
shown in Figs. 8 and 9.

In these tests the compressive strength of ordinary concretes was higher than that of barite concretes by 10% approximately when  $w/c < 0.4$ , but the strength was the same for  $w/c > 0.4$ . It was also

szywym z kawałków żelaza lub z kruszywem barytowym do osłony synchrotronu; publikacja nie zawiera informacji technologicznych. Właściwości mechaniczne betonów ciężkich ze śrutem stalowym do 2 mm, piaskiem do 4,75 mm i kruszywem z rudy żelaza badali Kan i in. (2004). Mimo wysokiej gęstości, stwierdzono tylko zbliżoną do zwykłego betonu wytrzymałość na ściskanie i niższą na rozciąganie, ponieważ z reguły propagacja rys określająca zniszczenie materiału przebiegała przez warstwy pomiędzy ziarnami kruszywa. Badania te wykazały, że użycie rudy żelaza w ilości 40% masy betonu dało najwyższą wytrzymałość na ściskanie i odporność na propagację rys wśród betonów ciężkich. Wyznaczone krytyczne wartości współczynniki intensywności naprężeń  $K_{IC}$  betonu okazały się mało przydatne do charakteryzowania badanych betonów. Moduły sprężystości wykonanych próbek wyznaczone doświadczalnie okazały się niższe od obliczonych według ACI i FIP-CEB (rysunek 10). Przygotowanie mieszanki wymagało dużej staranności, w celu uniknięcia segregacji.

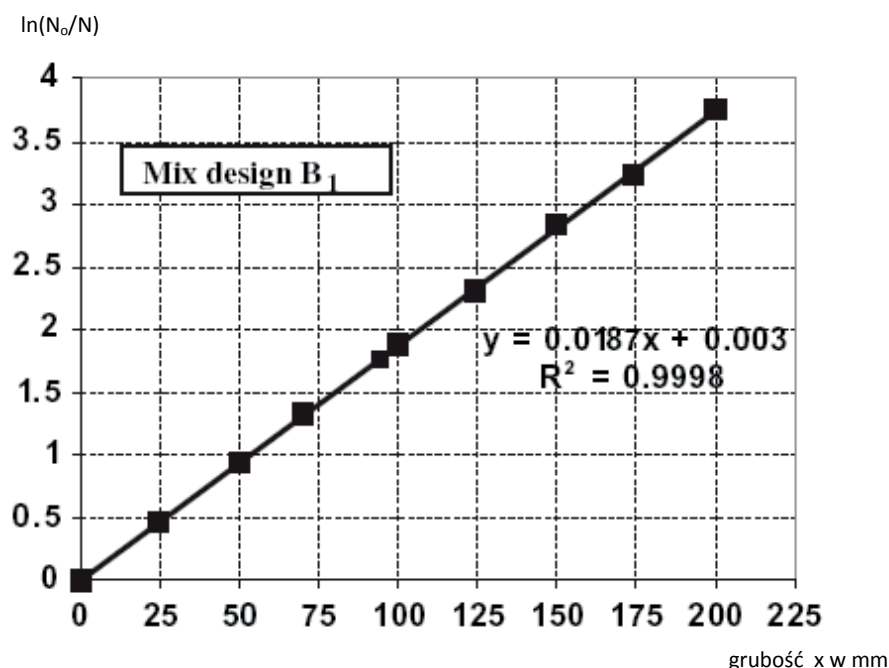
Różne rodzaje betonów z ciężkimi kruszywami badał Kansouh (2012) i przeprowadził porównanie czterech betonów o różnej gęstości: zwykłego (2300), serpentynowego (2400) oraz hematytowo-serpentytowego (2500) i ilmenitowo-limonitowego (2900 kg/m<sup>3</sup>) ze względu na właściwości osłony przed prędkimi neutronami i promieniowaniem  $\gamma$ . Uzyskane wyniki pozwoliły na wskazanie zakresów przydatności poszczególnych rodzajów betonu, przy czym beton ilmenitowo-limonitowy okazał się najsukuczniejszy w osłonie przeciw promieniowaniu  $\gamma$ , natomiast serpentynitowy - w osłonie przed prędkimi neutronami. Kruszywo serpentynitowe zawiera przy tym najwięcej wodoru, który pozostaje w nim nawet w temperaturze do 500°C. Natomiast z badań przeprowadzonych przez Makarioua i in. (1996) wynika, że dobre właściwości osłony przed prędkimi neutronami osiągnięto w przypadku betonu z kruszywem ilmenitowym, a dodawanie odłamków żelaznych okazało się niewłaściwe, wobec wzmożenia zderzeń neutronów i wywołania drugorzędowego promieniowania  $\gamma$  o wysokiej przenikliwości.

Wykonanie osłon z betonów ciężkich wymaga specjalnej technologii przygotowania mieszanin. Dobrą urabialność osiąga się trudniej i zwykle trzeba stosować większą zawartość drobnej frakcji kruszywa i cementu. Z tej samej przyczyny jednak współczynnik w/c nie powinien być wyższy niż 0,5. Co więcej, ze względu na ciężkie kruszywo konieczne jest ograniczenie czasu mieszania i inne zabiegi, aby uniknąć segregacji. Nie należy przekraczać dodatku cementu wynoszącego 450 kg/m<sup>3</sup>, ponieważ mogą wystąpić dwa



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

Fig. 8. Values of  $\ln(N_0/N)$  as function of the shield depth  $x$  [mm] for ordinary concrete with dolomite aggregate, Mostofinejad i in. (2012)



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

Fig. 9. Values of  $\ln(N_0/N)$  as function of the shield depth  $x$  [mm] for concrete with barite aggregate, Mostofinejad et al. (2012)

observed that all modifications of the mix proportions with increase of water/binder ratio ( $w/b$ ) and addition of silica fume resulted in decreasing of density and shielding ability of concrete, it means in decrease of  $\mu$  coefficient.

Heavy weight aggregates are also used as steel shot and scrap or lead powder and sand, but these additions increase considerably the cost and workability of concrete is becoming difficult because of segregation of the mix. After Ablewicz and Dubrowski (1986) similar additions were applied in the shields protecting experimental reactor EWA in Świerk. Concrete density was equal to 2600 kg/m<sup>3</sup>

niekorzystne skutki: wzrost temperatury podczas hydratacji i powiększenie skurczu; oba mogą spowodować powstanie rys i pogorszenie skuteczności osłony.

Ze względów ekonomicznych użycie ciężkiego kruszywa jest wskazane. Pomimo 3-4 razy większego jego kosztu niż kruszywa zwykłego, osłony betonowe o tej samej skuteczności mogą być znacznie cieńsze.

Przeprowadzone pomiary liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej w zakresie temperatur od 20 do 80°C próbek z betonu z kruszywem bazaltowym, barytowym i mieszanym z magnetytu i barytu wykazały odpowiednio następujące wartości:  $9,13 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,  $17,65 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  i  $16,75 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  [Abramowicz i Ciał (1975)]. Wartości te zależą znacznie od jakości i uziarnienia kruszywa, jednak różnice między tymi współczynnikami dla zwykłych i ciężkich betonów są istotne i muszą być uwzględniane w projektowaniu konstrukcji.

Liczne wyniki badań doświadczalnych betonów osłonowych z jednej strony dostarczają w ostatnich latach cennych informacji, ale równocześnie trzeba zauważyć, że nie wszystkie publikowane pomiary są w pełni zgodne. Zjawiska spowalniania i absorpcji neutronów o różnych prędkościach i energiach, a także wyzwalone przy tym wtórne promieniowanie  $\gamma$  są na tyle skomplikowane, że ich rozwiązanie musi być poszukiwane w konkretnych przypadkach osłon. Stwarza to konieczność podjęcia prac w celu uzyskania odpowiednich składów betonów osłonowych i szczególnie starannego ich projektowania, uwzględniającego oprócz efektów osłony przed różnymi rodzajami promieniowania także wymagania technologiczne oraz stosowane składniki. Oznacza to potrzebę przeprowadzenia różnorodnych badań przy użyciu lokalnych kruszyw i spoiw, a także importowanych kruszyw specjalnych, ponieważ zwiększony koszt betonu może być przynajmniej częściowo równoważony przez wykorzystanie możliwości ograniczenia grubości osłon betonowych.

Technologia wykonywania obudowy i osłon betonowych, często o znacznych rozmiarach, wymaga rozwiązywania poważnych trudności, które wymagają starannego podejścia. Wynika to m.in. ze wspomnianej możliwości segregacji w przypadku stosowania ciężkich kruszyw, konieczności ścisłego upakowania ziaren kruszywa, a także możliwości występowania w elementach o znacznych grubościach podwyższonej temperatury, na skutek hydratacji cementu. Obudowa reaktora i osłony to zwykle konstrukcje przestrzenne, o złożonych kształtach, a także z kanałami i otworami lub bruzdami. Uwzględnić przy tym należy, że współczynnik odkształcalności termicznej betonów ciężkich może być nawet dwukrotnie większy niż betonów zwykłych. Praktyczne informacje technologiczne zawarte są w pracy Kotona i Trybalskiego (2008).

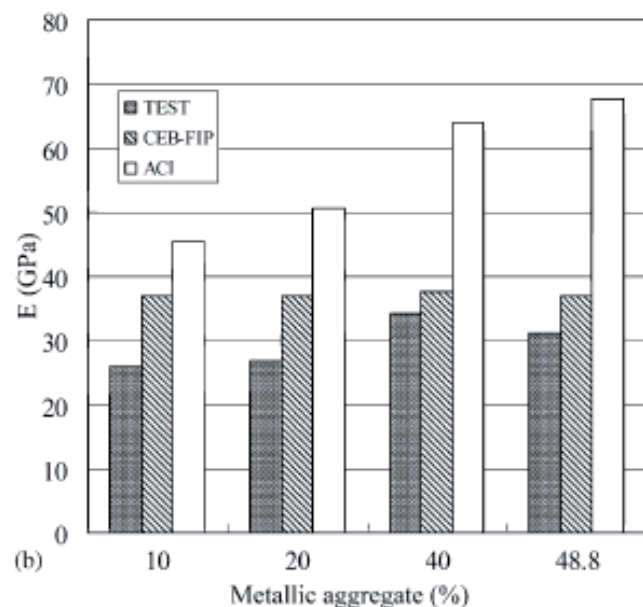
## 5. Trwałość i monitorowanie jakości betonu w osłonach

Konstrukcje betonowe w elektrowniach jądrowych podlegają tym samym procesom starzenia i czynnikom destrukcyjnym, co wszystkie inne konstrukcje. Czynniki atmosferyczne, korozyjny wpływ

with limonit aggregate and iron scrap. Layer depth HVL was determined as equal to 80 mm and 64 mm for fast and thermal neutrons, respectively.

Investigations published by Assano et al. (2011) allowed to confirm that application of two kinds of heavy weight concretes with iron scrap and barite aggregate was effective in the shields for a synchrotron; no technical details are available. Heavy concretes with steel shot up to 2 mm in diameter, sand to 4.75 mm and iron ore as aggregate were tested by Kan et al. (2004) for mechanical properties. Even with high density, the compressive strength was similar to that of ordinary concrete, tensile strength was lower because of cracks that passed through intermediary layers between aggregate grains. The tests proved that iron ore used in 40% of concrete mass ensured highest compressive strength and resistance against crack propagation in heavy concretes. Calculated critical values of stress intensity factor  $K_{Ic}$  in Mode I of these concretes were not useful in characterization of these materials. Values of modulus of elasticity from tests were lower than calculated according to ACI and FIP-CEB formulae. Mixing of these components required special care in order to avoid segregation.

Extensive tests of concretes with heavy aggregates were executed by Kansouh (2012), comparing four concretes with different aggregates and densities: ordinary (2300), serpentine (2400), hematite-serpentine (2500) and ilmenit-limonit ( $2900 \text{ kg/m}^3$ ), respectively. These concretes were tested as shields against fast neutron and  $\gamma$  radiation. After obtained results it was possible to determine scopes of efficiency of particular kinds of concrete and it resulted that ilmenit-limonit concrete was the best to attenuate  $\gamma$  radiation, while serpentine concrete was the most effective against fast neutrons. Serpentine aggregate contained the highest amount of



Rys. 10. Wartości modułu sprężystości ciężkiego betonu porównane z obliczonymi według wzorów ACI i CEB-FIP, Kan i in. (2004)

Fig. 10. Modulus of elasticity of heavy concrete compared with ACI and CEB-FIP codes, Kan et al. (2004)

podłoża gruntowego, a także zjawiska zachodzące w mikrostrukturze betonu (np. reakcja z alkaliarni), 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 korozji zbrojenia i zmiany sił wciąganych sprężających, mogą świadczyć o spadku nośności poszczególnych elementów lub o zmniejszeniu szczelności osłon. Studium wpływu powstawania rys w obudowie betonowej na wartość osłony przed promieniowaniem  $\gamma$  przeprowadzili Lee i in. (2007). Rysy powstają przede wszystkim na skutek podwyższonej temperatury w obudowie, a 0,4 mm przyjęto jako dopuszczalną rozwarłość rysy, chociaż w ścianie o grubości 200 mm może zmniejszyć szczelność o 10%. Wszystkie takie defekty muszą być rejestrowane, a ich znaczenie oceniane z punktu widzenia ewentualnej konieczności dalszych działań [Naus (1999)].

Przykład fragmentu kontroli technicznej opublikowali Zheng Y.G. i Li H.Q. (2011), Dotyczył sprężonych obudów dwóch reaktorów po pięciu latach eksploatacji i zagadnień związanych ze starzeniem betonu, przy czym badano także wpływ czynników klimatycznych i wycieki płynów chłodzących. Trzy wielkości szczególnie starannie mierzono: przepuszczalność powietrza, sorpcyjność i przepuszczalność wody przez osłony. Przyjęte kryteria do oceny wyników pomiarów są pokazane w tablicy 4. Na tej podstawie oceniono jakość betonu w dwóch obiektach; w jednym stwierdzono bardzo dobrą szczelność, a w drugim – tylko dobrą, zalecając dalszą obserwację i kontrolę. Nie podano ani wartości, uzyskanych w tych konstrukcjach bezpośrednio po ich wykonaniu, ani sugestii co do przyczyn zmian.

Cykle zamrażania i rozmrażania elementów z betonu barytowego mogą powodować wyraźne zmiany wartości współczynnika  $\mu$ , który określa zdolność tłumienia promieniowania  $\gamma$ . Badania tych zmian w przypadku kruszywa barytowego zawierającego aż 90% BaSO<sub>4</sub> opublikowali Basyigit i in. (2006). W szczególności, stwierdzono spadek wartości  $\mu$  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  $\mu$ . We wnioskach jednak nie zalecono stosowania kruszywa barytowego w osłonach betonowych, narażonych na zamrażanie.

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 silne promieniowanie tylko w sytuacjach awaryjnych, a więc nieznanających się pod stałym działaniem promieniowania.

Tablica 4 / Table 4

KRYTERIA OCENY JAKOŚCI BETONU ZE WZGLĘDU NA SZCZELNOŚĆ, ZHENG Y.G. I LI H.Q. (2011)

CRITERIA FOR CONCRETE QUALITY WITH RESPECT TO IMPERMEABILITY, ZHENG Y.G. AND LI H.Q. (2011)

Wielkości Dimension	Kryteria jakości betonu/Quality criteria			
	bardzo dobra very good	dobra good	słaba weak	bardzo słaba very weak
przepuszczalność powietrza $\ln(10^2 \text{ Pa}) \cdot \text{min}^{-1}$	$\leq 0,10$	0,10 – 0,50	0,50 – 0,90	$> 0,90$
sorpcyjność / sorptivity $(10^{-7} \text{ m}^3 \text{ min}^{-1/2})$	$\leq 1,30$	1,30 – 2,60	2,60 – 3,40	$> 3,40$
przepuszczalność wody / water permeability $(10^{-7} \text{ m}^3 \text{ min}^{-1/2})$	$\leq 3,70$	3,70 – 9,40	9,40 – 13,80	$> 13,80$

hydrogen that was maintained even up to 500°C. On the contrary, from the tests executed by Makariou et al. (1996) it followed that good results were obtained with ilmenit aggregate in concrete used as protection against fast neutrons, and that addition of iron scrap gave negative results because of number of collisions was increased and highly penetrating secondary radiation  $\gamma$  was intensified.

Concretes with heavy weight aggregate require special technology when fresh mix is prepared. The workability is more difficult than ordinary concretes and more fine aggregate and cement is usually required; for the same reason, the  $w/c$  ratio should not be higher than of 0.5. Moreover, because of high density aggregate shorter mixing time should be applied and other measures to avoid segregation. It is not advisable to use more cement than 450 kg/m<sup>3</sup> because two unfavourable effects may appear: increase of temperature during hydration and higher shrinkage. Both may initiate cracking of concrete and spoil the shielding performance.

From economical viewpoint, the use of heavy weight aggregate is always advisable. Though its unit cost is approximately 3-4 times higher with respect to ordinary aggregates, but the concrete shields of the same protective value may be much thinner.

Performed measurements of linear expansion coefficients performed on specimens of concrete with basalt, barite and mixed magnetite, and barite aggregates at temperature varying from 20 to 80°C have shown following values:  $9.13 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,  $17.65 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$  and  $16.75 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , respectively [Abramowicz and Ciaś (1975)]. These values are very much dependent upon quality and granulation of the aggregate, however, the difference between these coefficients for ordinary and heavy weights concretes is important and should be considered in structural design.

In the papers published last years there are many valuable experimental results related to concrete shields, but it should be taken into consideration that not all of them are entirely in agreement. The phenomena of attenuation and absorption of neutrons with different speeds and energies, and initiation of secondary  $\gamma$  radiation are so complicated that the solution should be looked for in each particular case separately. It is therefore necessary to start investigations in order to determine appropriate concrete composition for shields and their optimum design. Apart from satisfaction of shielding requirements against different radiation, various exploitation and

Zagadnienia związane z eksploatacją reaktorów atomowych nabierają szczególnego znaczenia wobec poważnych kosztów wynikających z wymagania zapewnienia 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 ponad 30 lat, a 358 – dłużej niż 20 lat.

Obecnie jest na świecie eksploatowanych szereg odmian reaktorów atomowych nowych generacji i we wszystkich elementy betonowe stanowią konstrukcje nośne i osłony w różnych warunkach. Także w obecnie budowanych reaktorach lub projektowanych, betony specjalne mają ważne znaczenie. Eksploatacja reaktorów atomowych jest regulowana ścisłymi przepisami, związanymi z bezpieczeństwem w skali krajowej i międzynarodowej, a dotyczącymi także konstrukcji i osłon betonowych, które muszą odpowiadać wymaganiom. Interesujące informacje na temat wymaganych badań prowadzonych w USA i rozpoczętych prac naprawczych poszczególnych konstrukcji można znaleźć na przykład w pracach Nausa i współautorów (1996), (1999) i (2009), a także w innych artykułach tego zespołu, publikowanych w latach 2006 i 2008.

Złożone zagadnienia związane w systematyczną kontrolą stanu konstrukcji betonowych w elektrowniach atomowych mają szczególne znaczenie w USA ponieważ wiele z nich pracuje już około 40 lat, co oznacza konieczność podjęcia decyzji o przedłużeniu eksploatacji lub o rozbiórce. Obszerne studium na temat metod oceny przydatności osłon betonowych po wielu latach eksploatacji przygotowane zostało przez Clifftona (1991), w którym opisano szczegółowo metody badania i oceny. Podobnie we Francji i w kilku innych krajach reaktory jądrowe są wyłączane po zakończeniu eksploatacji, lub też są poddawane badaniom w celu stwierdzenia możliwości dalszego użytkowania.

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 zawniasz zasady związane z eksploatacją i systematyczną kontrolą tych konstrukcji. Dotychczas na podstawie próbek pobieranych ze składowiska w Różanie nie stwierdzono po około 40 latach żadnych zmian strukturalnych betonu, a trwałość użytego betonu oceniono pozytywnie [Szteke i in. (2010)].

Trwałość betonu w osłonach dotyczy także wszystkich zagadnień niezwiązanych z oddziaływaniem promieniowania jonizującego, np. szeroko rozumianą przepuszczalnością betonu. Przepuszczalność betonu uznaje się za jedną z podstawowych cech umożliwiających przewidywanie i ocenę jego trwałości w środowiskach agresywnych. Przenikanie agresywnych mediów ciekłych jak np. jony chlorkowe, Marks i in. (2012) i gazowych – CO<sub>2</sub> Józwiak-Niedźwiedzka i in. (2011), (2013) może prowadzić do korozji zbrojenia stalowego i wywoływać zniszczenie konstrukcji żelbetowych. Natomiast samozarastanie rys w elementach żelbe-

technological conditions should be considered. This means that multiple tests should be executed with application of local aggregates and binders, also with imported aggregates, because even increased unit cost of concrete may be at least partly equilibrated by possibility of thinner concrete shields.

Execution of reactor containments and concrete shields, often of large dimensions, is associated with multiple technological difficulties that should be solved with care. This is related, among others, with a possibility of segregation of the heavy concrete mix, with necessary dense packing of aggregate grains, and also with possibility of elevated temperature because of cement hydration in concrete elements with large dimensions. Besides, the reactor containment and shields are always spatial structures with complex forms, channels and orifices. It should be also taken into account that heavy concretes are characterized by thermal expansion coefficient that may be even twice as big as for ordinary concretes. Several practical information were published by Koton and Trybalski (2008) on technology of such construction.

## 5. Durability and control of concrete in shields

Concrete structures in nuclear power plants depend on the same ageing and destructive processes as all other structures. Atmospheric agents, corrosive influence of the soil, and also various phenomena that develop in the concrete microstructure itself, e.g. alkali-aggregate reaction, can have destructive influence on the reactor containment and on all other concrete structures in a plant. Negative effects as surface destructions, that are exposed on freeze-thaw cycles, opening of cracks and local flaws, also corrosion of reinforcement and modifications in prestressing forces, may prove that bearing capacity or tightness of shields are decreased. Analysis of the influence of cracking in concrete containment on its value as a shield protecting against radiation was published by Lee et al. (2007). Cracks appear mostly due to elevated temperature in shields and opening equal to 0.4 mm was assumed as admissible, though it may decrease impermeability of a 200 mm wall by 10%. The defects of all kinds should be recorded in a systematic way, with carefully estimation of their importance with respect to possibility of necessary repairs, Naus (1999).

An example of a technical verification in a nuclear energy plant was published by Zheng Y.G. and Li H.Q. (2011). It concerned prestressed concrete containments of two nuclear reactors after five years of exploitation, and problem of concrete ageing was particularly examined. Influence of climatic actions and possibility of leakage in cooling systems were considered also. Three characteristics were carefully measured: air permeability, sorptivity and water permeability across shields. The criteria adopted for the results of measurements are shown in Table 4. On that basis concrete in two buildings was qualified: in one of them tightness of the shields was considered as very good, in the second – only good, with recommendation of further control and observations. No characteristic values, neither reasons of their degradation were published.



towych może spowodować zmniejszenie przepuszczalności ich warstw zewnętrznych, które zapewniają otulenie stalowego zbrojenia, chroniące przed korozyjnymi oddziaływaniami zewnętrznymi, Józwiak-Niedźwiedzka i in. (2012).

## 6. Podsumowanie

Poziom wiedzy o zastosowaniu betonu w budownictwie związanym z energetyką jądrową wzrósł znacznie w porównaniu do poprzedniego okresu, w którym podejmowano tę tematykę w Polsce. Beton pozostał najważniejszym materiałem do osłon przed promieniowaniem jonizującym, jednak szeregu zagadnień nie rozwiązano w sposób jednoznaczny. Obecny stan wiedzy i techniki musi być uzupełniony szczegółowymi badaniami, przeprowadzonymi na podstawie znajomości dostępnych materiałów, warunków meteorologicznych w kraju i wymagań normowych. Niezbędne jest uwzględnienie zagadnień ekonomicznych przy zapewnieniu bezpieczeństwa, w oparciu o najnowsze metody badawcze i projektowe.

Konieczne jest podjęcie i rozwijanie badań we współpracy z firmami wykonawczymi. Prace takie powinny wyprzedzać decyzje inwestycyjne i budowę elektrowni nuklearnych nowych generacji w Polsce. Jest to ważne niezależnie od technologii stosowanych przez firmy krajowe czy zagraniczne.

## Literatura / References

1. Z. Ablewicz, W. B. Dubrowski, Osłony przed promieniowaniem jonizującym. Arkady, Warszawa 1986.
2. M. Abramowicz, A. Cias, Rozszerzalność liniowa betonów osłonowych. Arch. Inż. Łąd., **21**, 4, 667-677 (1975).
3. I. Akhurt, C. Basyigit, S. Kilincarslan, B. Mavi, A. Akhurt, Radiation shielding of concretes containing different aggregates, Cem. Concr. Res., **28**, 153-157 (2006).
4. I. Akhurt, H. Akyildirim, B. Mavi, S. Kilincarslan, C. Basyigit, Radiation shielding of concrete containing zeolite. Radiation Measurements, **45**, 827-830 (2010).
5. M. Alexander, S. Mindess, Aggregates in concrete, Taylor & Francis 2005.
6. Y. Asano, Application of heavy concretes to the shield materials of synchrotron radiation beams. Radiation Measurements **46**, 546-550 (2011).
7. I. I. Bashter, A. S. Makarios, Abdro A. El-Sayed, A comparative study of the attenuation of reactor thermal neutrons in different types of concrete. Ann. Nucl. Energy, **23**, 14, 1185-1195 (1996).
8. I. I. Bashter, Abdro A. El-Sayed, A. S. Makarios, Investigation of hematite-serpentine and ilmenite-limonite concretes for reactor radiation shielding, Ann. Nucl. Energy, **23**, 1, 65-71 (1996).
9. H.-D. Beushausen, M. G. Alexander, High-density concrete for special applications. Betonwerk & Fertigteil Technik, Fachbeiträge **9** (2003).
10. C. Basyigit, J. Akkurt, R. Altindag, S. Kilincarslan, A. Akkurt, B. Mavi, R. Karaguzel, The effect of freezing-thawing (F-T) cycles on the radiation shielding properties of concretes. Building and Environment, **41**, 1070-1073 (2006).
11. D. G. Bennett, R. Gens, 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 (2008).
12. E. Calzada, F. Grünauer, B. Schillinger, H. Türck, Reusable shielding material for neutron- and gamma- radiation. Nucl. Instr. and Methods in Ph. Res. A **651**, 77-80 (2011).
13. J. R. Clifton, Predicting the remaining service life of concrete. NIST, US Dept. of Commerce 1991.
14. O. Gencel, Physical and mechanical properties of concrete containing hematite as aggregates. Sci. Eng. Compos. Mater, **19**, 2, 191-199 (2011).
15. O. Gencel, W. Brostow, C. Ozel, M. Filiz, An investigation on the concrete properties containing colemanite. Int. J. of Physical Science, **5**, 3, 216-225 (2010).
16. O. Gencel, A. Bozkurt, E. Kam, T. Korkut, Determination and calculation of gamma and neutron shielding characteristics of concretes

Freezing and thawing cycles of concrete shields, if occurred during exploitation, can modify considerably coefficient  $\mu$ , which characterizes ability of attenuation of  $\gamma$  radiation. Results of investigations related to concrete based on barite aggregate with 90% of  $\text{BaSO}_4$  were published by Basyigit et al. (2006). They observed a decrease of coefficient  $\mu$  with the number of cycles up to 50, however, coefficient  $\mu$  was always higher for barite concrete than for ordinary one. It was also concluded that increase of density and w/c in barite concrete resulted in increase of value of coefficient  $\mu$ . Nevertheless, in conclusions, the application of barite concrete was not recommended in the shields where freezing was possible.

In the elements that are subjected to radiation, a systematic control is particularly required and consequently execution of repairs, Naus (2009). Other conditions are imposed on the shields which may be exposed to intensive radiation only in a case of an accident and do not irradiated during normal exploitation.

The problems with exploitation of nuclear reactors are becoming particularly important at present because of the costs necessary for assurance of their durability in the situation when many of nuclear power plants are becoming relatively old. After IAEA for the end of 2010, there were 441 nuclear power plants in the world, and among them already 152 were exploited over 30 years, and 358 over 20 years.

There are several kinds of nuclear reactors of new generations exploited at present in the world and in all of them the concrete elements are used in construction of containment and shields for different conditions. Also in new reactors under construction or in perspectives, special concretes play important roles. Exploitation of nuclear reactors is subjected to very strict regulations, related to safety both at national and international scale, and consequently concrete structures and shield should satisfy several conditions. Interesting information on the series of control tests executed in the USA, and on initiated upgrading of particular constructions, is published by Naus and his co-workers, (1996), (1999) and (2009), and also in other reports by that group published in 2006 and 2008.

The complex problems related to systematic control of concrete structures in nuclear power plants is important in the USA, because quite a number of these installations approach to 40 years of age. That means necessary decisions on their further exploitation or decommissioning. Extensive study of the problem was prepared by Clifton (1991), and detailed methods of evaluation of the usefulness of concrete shields after many years of service were proposed. Also in France and several other countries old reactors are decommissioned or verified with respect to possibility of their longer exploitation.

In Poland the problems related to exploitation and durability of nuclear power plants should be carefully studied in order to avoid some mistakes made in other countries, or even to limit consequences of imperfect solution in selection of materials and constructions. It seems necessary to prepare in advance adequate procedures related to exploitation and systematic control of such structures. Until now, concrete specimens taken from the storage

containing different hematite proportions. *Ann. of Nucl. Energy*, **38**, 2719-2733 (2011).

17. D. Józwiak-Niedźwiedzka, K. Gibas, M. A. Glinicki, G. Nowowiejski, Szczelność betonów z popiołem lotnym wapiennym wobec wnikania mediów agresywnych, *Drogi i Mosty*, **11**, 3, 39-61 (2011).
18. D. Józwiak-Niedźwiedzka, A. M. Brandt, Z. Ranachowski, Self-healing of cracks in fibre reinforced mortar beams made with high calcium fly ash, *Cement Wapno Beton*, **79**, 1, 38-49 (2012).
19. D. Józwiak-Niedźwiedzka, M. Sobczak, K. Gibas, Karbonatyzacja betonów z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **12**, 2, 131-146 (2013).
20. Y. Ch. Kan, K. C. Pei, C. L. Chang, Strength and fracture toughness of heavy concrete with various iron aggregate inclusions. *Nucl. Eng. and Design*, **228**, 119-127 (2004).
21. W. A. Kansouh, Radiation distribution through serpentine concrete using local materials and its application as a reactor biological shield. *Ann. of Nucl. Energy*, **47**, 258-263 (2012).
22. M. F. Kaplan, *Concrete radiation shielding*. John Wiley & Sons, N. York 1989.
23. M. H. Kharita, S. Yousef, M. Al Nassar, The effect of the initial water to cement ratio on shielding properties of ordinary concrete. *Progress in Nuclear Energy*, **53**, 491-493 (2010).
24. M. H. Kharita, S. Yousef, M. Al Nassar, Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete. *Progress in Nuclear Energy*, **53**, 207-211 (2011).
25. M. H. Kharita, M. Takeyeddin, M. Alnassar, S. Yousef, Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics. *Progress in Nuclear Energy*, **50**, 33-36 (2008).
26. S. Kilincarslan, I. Akhurt, C. Basyigit, The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete. *Materials Science and Engineering A* **424**, 83-86 (2006).
27. T. Korkut, A. Karabulut, G. Budak, Aygün, O. Gencel, Investigation of neutron shielding properties depending on number of boron atoms for colemanite, ulexite and tincal ores by experiments and FLUKA Monte Carlo simulations. *Appl. Rad. and Isot.*, **70**, 341-345 (2012).
28. A. Koton, P. Trybalski, Beton barytowy jako osłona przed promieniowaniem radioaktywnym. *Stow. Prod. Cem., Konf. „Dni Betonu”*, 685-694, Wisła 2008.
29. C. M. Lee, Y. H. Lee, K. J. Lee, Cracking effect on gamma-ray shielding performance in concrete structure, *Prog. in Nucl. Energy*, **49**, 303-312 (2007).
30. A. S. Makarios, I. I. Bashter, Abdo A. El-Sayed, M. Samir Abdel Azim, W. A. Kansouh (1996) *Ann. Nucl. Energy*, **23**, 3, 195-206 (1996).
31. M. Marks, D. Józwiak-Niedźwiedzka, M. A. Glinicki, Automatic categorization of chloride migration into concrete modified with CFBC ash, *Int. J. Computers and Concrete*, **9**, 5, 393-405 (2012).
32. S. Mindess, J. F. Young, D. Darwin, *Concrete*, 2<sup>nd</sup> ed., Prentice Hall 2003.
33. S. M. J. Mortazavi, M. A. Mosleh-Shirazi, N. Raadpeyl, M. Baradaran-Ghahfarokhi, High-performance heavy concrete for multi-purpose shield. *Oxford Journals on-line*, October 2010.
34. D. Mostofinejad, M. Reisi, A. Shirani, Mix design effective parameters on c-ray attenuation coefficient and strength of normal and heavyweight concrete. *Construction and Building Materials*, **28**, 224-229 (2012).
35. D. J. Naus, C. B. Oland, B. R. Ellingwood, H. L. Graves III, W. E. Norris, Aging management of containment structures in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, **166**, 367-379 (1996).
36. D. J. Naus, ed. (1999) Considerations for use in managing the aging of nuclear power plant concrete structures. *RILEM Report 19* (1999).
37. D. J. Naus, The management of aging in nuclear power plant concrete structures, *JOM*, **61**, 7, 35-41, July 2009.
38. A. M. Neville, *Properties of Concrete*, Pitman 1963.
39. D. R. Ochbelagh, S. A. Khani, H. G. Mosavinejad, Effect of gamma and lead as an additive material on the resistance and strength of concrete. *Nuclear Engineering and Design* **241**, 2359-2363 (2011).
40. E. Pohl, *Technika jądrowa w budownictwie*. Arkady, Warszawa 1967.
41. W. Szteke, E. Hajewska, W. Bilous, M. Przyborska, A. Malczyk, J. Wasiak, M. Wieczorkowski, Z. Rozenblicki, Badanie betonów stosowanych w technologiach jądrowych, *IEA Polatom, Raport A 145*, 73-79 (2010).
42. I. B. Topçu, Properties of heavyweight concrete produced with barite. *Cem. Concr. Res.*, **33**, 6, 815-822 (2003).
43. Y. Yarar, Activation characteristics of concrete shields containing colemanite. *J. of Nuclear Materials*, **233-237**, 1511-1515 (1996).
44. Y. Zheng, H. Li, Evaluation of protective quality of prestressed concrete containment buildings of nuclear power plant. *J. Cent. South. Univ. Technol.*, **18**, 238-243 (2011).
45. International Atomic Energy Agency (IAEA), P.O. Box 100, Wagramer Strasse 5, A-1400 Vienna, Austria, [Official.Mail@iaea.org](mailto:Official.Mail@iaea.org)

in Rózan after appr. 40 years did not show any structural modifications, and durability of the shields was proved, Szteke et al. (2010).

Durability of concrete in the shields concerns also all other actions not related to ionizing radiation, but also to the concrete permeability in general. Permeability of concrete is considered as one of principal properties that is used to control and to forecast its durability in aggressive environments. Penetration of aggressive fluids as chloride ions, Marks et al. (2012), and gases – CO<sub>2</sub> Józwiak-Niedźwiedzka et al. (2011), (2013) can lead to corrosion of steel reinforcement and to serious structural damages. The opposite phenomenon – self healing of microcracks – in reinforced concrete shields may limit permeability considerably, particularly their external layers. By that means, steel reinforcement may be better covered against corrosive agents, Józwiak-Niedźwiedzka et al. (2012).

## 6. Conclusions

Present state of knowledge on application of concrete in the shields in constructions related to nuclear power plants is considerably more developed than it was several years ago, when these investments were initiated in Poland. Concrete remained one of the most important material for structural and protection applications, but there are still several problems which are not completely solved. It is necessary to develop further steps of research based on actual achievements, and also considering available materials, local meteorological conditions and standard regulations. Both safety and economical requirements should be satisfied, taking into account advanced methods of testing and designing.

New research programs that should be prepared and realized in close cooperation with execution companies are necessary. Such research programs should precede designing and building of nuclear power plants of new generation in Poland; this is important regardless of whether local or international companies will realize that important task.