

Wpływ składników betonu na jego podatność na uszkodzenia radiacyjne

Influence of concrete constituents on its susceptibility to irradiation damage

Michał A. Glinicki^{1,*}

¹Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, Warszawa

Corresponding author: M. Glinicki, e-mail: mglinic@ippt.pan.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono przegląd wyników badań właściwości betonu przeznaczonego na osłony radiologiczne w elektrowniach jądrowych. Nowe wyniki uzyskane w ostatnich latach w ramach projektu międzynarodowego RADCON omówiono na tle innych publikacji. Przedstawiono efekty oddziaływania promieniowania gamma na twardniejącą zaprawę i beton, ujawniające temperaturowy równoważnik promieniowania. Zanotowane uszkodzenia radiacyjne stwardniałego betonu wywołane promieniowaniem gamma obejmowały przyspieszenie przebiegu karbonatyzacji w kontrolowanych warunkach środowiskowych, wzrost wielkości kryształów kalcytu i zmianę ich właściwości mikromechanicznych oraz utratę stabilności warstwy pasywnej na stali zbrojeniowej w betonie. Neutronowa analiza aktywacyjna wykazała obecność izotopów promieniotwórczych, zwłaszcza dłużyżyciowych ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu i ¹³⁴Cs, w krajowych cementach portlandzkich i kruszywach mineralnych. Z uwagi na istotny wpływ jednorodności betonu na osłonność omówiono nowe narzędzia eksperymentalno-liczebne do cyfrowej rekonstrukcji mikrostruktury i do przewidywania pola temperatury w twardniejącym betonie. Na podstawie opracowanych receptur składu betonu ciężkiego samozagęszczalnego omówiono zagadnienie ich parcia na deskowanie. Nowe elementy wiedzy o uszkodzeniach radiacyjnych betonu i narzędzia badawcze mogą być użyteczne do optymalizacji składu i technologii betonu w nowych obiektach energetyki jądrowej.

Słowa kluczowe: beton osłonowy, mikrostruktura, napromienienie gamma, trwałość

Summary

The article presents a review of research findings on the properties of concrete intended for radiological shielding in nuclear power plants. New results obtained in recent years within the framework of the international RADCON project are discussed in the context of other publications. The effects of gamma irradiation on hardening mortar and concrete are presented, revealing the temperature-equivalent nature of the radiation. The observed radiation-induced damage in hardened concrete exposed to gamma rays included an acceleration of carbonation under controlled environmental conditions, an increase in the size of calcite crystals and their micromechanical properties, and a loss of stability of the passive layer on reinforcing steel embedded in the concrete. Neutron activation analysis revealed the presence of radioactive isotopes, particularly long-lived ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu, and ¹³⁴Cs, in domestic Portland cements and mineral aggregates. Given the significant influence of concrete homogeneity on shielding performance, new experimental–numerical tools for digital microstructure reconstruction and for predicting the temperature field in hardening concrete are discussed. Based on the developed mix designs for heavy self-compacting concrete, the issue of their pressure on formwork is addressed. The new knowledge concerning radiation-induced damage in concrete and the research tools described may be useful for optimizing the composition and technology of concrete in new nuclear energy facilities.

Keywords: radiation-shielding concrete, microstructure, gamma irradiation, durability

1. Wprowadzenie

Blisko 30% energii elektrycznej produkowanej w krajach UE pochodzi z elektrowni jądrowych. Bezpieczeństwo ich użytkowania

1. Introduction

Nearly 30 % of the electricity generated in EU countries comes from nuclear power plants. Ensuring their safe operation is an

jest ważnym zagadnieniem społecznym. Średnia wieku elektrowni jądrowych w UE i USA wynosi odpowiednio 35 i 39 lat, a oryginalnie projektowano je na 30-40 lat eksploatacji. Ze względów ekonomicznych przewiduje się przedłużenie licencji na użytkowanie wielu z nich do 60 lat, a nawet do 80 lat (1). Przedłużony czas użytkowania elektrowni oznacza większe narażenie obiektów osłonowych na promieniowanie – obejmuje to betonowe konstrukcje osłony biologicznej i konstrukcje wsporcze zbiornika reaktora, obudowę bezpieczeństwa, basen paliwowy i osłony w budynkach gospodarki odpadami promieniotwórczymi.

Program rozwoju energetyki jądrowej w Polsce – wstrzymany po katastrofie elektrowni jądrowej w Czarnobylu – został niedawno wznowiony, aby zbudować potrzebne dla rozwoju stabilne źródła energii i wspierać działania na rzecz dekarbonizacji krajowej produkcji energii. Pogłębione zrozumienie zagadnień degradacji betonu pod wpływem promieniowania jest istotne nie tylko dla oceny diagnostycznej osłon betonowych w działających elektrowniach jądrowych, jak również do optymalizacji składu mieszanek betonowych przeznaczonych na nowe obiekty jądrowe.

Kontrolowana reakcja łańcuchowa rozszczepień jąder uranu-235 w paliwie jądrowym, zachodząca w reaktorach energetycznych, prowadzi do emisji neutronów i promieniowania gamma oraz do wydzielania dużych ilości energii cieplnej, a wtórne rozpady promieniotwórcze produktów rozszczepienia są źródłem promieniowania alfa i beta. W reaktorach wodno-ciśnieniowych typu zbiornikowego moderatorem neutronów i czynnikiem chłodzącym jest woda z dodatkiem kwasu borowego. Stałowy zbiornik reaktora jest otoczony betonową osłoną, która podlega oddziaływaniu promieniowania i podwyższonej temperatury. Długotrwale oddziaływanie promieniowania jonizującego na osłony radiologiczne może wywołać zmiany właściwości fizycznych i mechanicznych betonu (2). Szacuje się, że po 50 latach pracy reaktora narażenie betonu w obudowie na strumień neutronów określa fluencja ok. $5 \cdot 10^{19}$ n/cm², natomiast po 80 latach eksploatacji fluencja neutronów może sięgać do 10^{20} n/cm² (3). Oszacowana pochłonięta dawka promieniowania gamma po 60 letniej eksploatacji w przypadku japońskich reaktorów energetycznych wynosi 80-280 MGy na powierzchni osłony biologicznej od strony zbiornika reaktora lub 16-23 kGy na powierzchni konstrukcji wsporczej zbiornika reaktora (4). Z uwagi na wymuszoną cyrkulację powietrza w szczelinie między reaktorem a osłoną biologiczną temperatura w betonie nie przekracza 65°C podczas normalnej pracy reaktora.

Badania Hilsdorfa, Kroppa i Kocha (5) wykazały znaczny spadek wytrzymałości betonu po przekroczeniu granicznych poziomów napromienienia: fluencja neutronów 10^{19} n/cm² i pochłonięta dawka promieniowania gamma $2 \cdot 10^2$ MGy. Późniejsza analiza tych badań (6) wskazała jednak pominięcie istotnego wpływu temperatury powyżej 100°C oraz rodzaju cementu. Obecnie przyjmuje się, że przy fluencji neutronów $>10^{19}$ n/cm² wytrzymałość betonu na ściskanie może zmniejszyć się o 50%, a na rozciąganie – jeszcze bardziej, czemu towarzyszy też znaczne obniżenie modułu sprężystości.

important social issue. The average age of nuclear power plants in the EU and the USA is 35 and 39 years, respectively, while they were originally designed for 30-40 years of operation. For economic reasons, many of them are expected to have their operating licenses extended to 60 years, and even up to 80 years (1). Extending the service life of power plants means greater exposure of shielding structures to radiation – this includes the concrete biological shielding of reactor vessel and its support structure, containment structure, fuel pool as well as shielding within radioactive waste management buildings.

Poland's nuclear energy development program—halted after the Chernobyl power plant disaster—has recently been resumed in order to build stable energy sources needed for development and to support decarbonization efforts in domestic energy production. A deeper understanding of concrete degradation under radiation exposure is essential not only for diagnostic assessment of concrete shields in operating nuclear power plants, but also for optimizing the composition of concrete mixes intended for new nuclear facilities.

The controlled chain reaction of the uranium-235 fission in nuclear fuel, occurring in power reactors, leads to the emission of neutrons and gamma radiation, as well as the release of large amounts of thermal energy, while the secondary radioactive decay of fission products provides a source of alpha and beta radiation. In pressurized water reactors, water with the addition of boric acid serves as the neutron moderator and coolant. The steel reactor pressure vessel is surrounded by a concrete biological shield, which is subjected to the effects of radiation and elevated temperatures. Long-term exposure of radiological shielding to ionizing radiation may lead to changes in the physical and mechanical properties of concrete (2). It is estimated that after 50 years of reactor operation, the neutron flux exposure of the containment concrete corresponds to a fluence of approximately $5 \cdot 10^{19}$ n/cm², whereas after 80 years of service the neutron fluence may reach up to 10^{20} n/cm² (3). The estimated absorbed gamma radiation dose after 60 years of operation in the case of Japanese nuclear reactors is 80–280 MGy on the surface of the biological shield facing the reactor vessel, or 16–23 kGy on the surface of the reactor vessel support structure (4). Due to forced air circulation in the gap between the reactor and the biological shield, the temperature in the concrete does not exceed 65 °C during normal reactor operation.

Studies by Hilsdorf, Kropp, and Koch (5) demonstrated a significant decrease in concrete strength once critical irradiation levels are exceeded: a neutron fluence of 10^{19} n/cm² and an absorbed gamma dose of $2 \cdot 10^2$ MGy. However, a later analysis of these studies (6) indicated that the significant influence of temperatures above 100 °C and the type of cement had been overlooked. It is now generally accepted that when neutron fluence exceeds 10^{19} n/cm², the compressive strength of concrete may decrease by 50 %, and its tensile strength even more, accompanied by a substantial reduction in the elastic modulus.

Przegląd zagadnień dotyczących uszkodzeń radiacyjnych betonu przedstawili Rosseel i in. (2) oraz Brandt (7). Zaobserwowano następujące główne mechanizmy degradacji betonu pod wpływem promieniowania:

- a) wysychanie i skurcz zaczynu cementowego wskutek radiolizy wody [promieniowanie gamma],
- b) powstawanie defektów sieci krystalicznej kruszywa i jego pęcznienie [promieniowanie neutronowe].

Oba mechanizmy prowadzą do spękań, spadku wytrzymałości i wzrostu przepuszczalności betonu. Stwierdzono, że promieniowanie neutronowe powoduje ekspansję ziaren kruszywa i skurcz zaczynu cementowego. Przy fluencji $5 \cdot 10^{19}$ n/cm² skurcz zaczynu z cementu portlandzkiego wynosi ok. 2%, a ekspansja kruszyw 0,1-1% (1). Ekspansja betonu rośnie wraz z zawartością SiO₂ w kruszywie, co koreluje z pogorszeniem właściwości mechanicznych. Absorpcja promieniowania prowadzi do wydzielania ciepła, jednak wzrost temperatury w betonie jest niewielki [do ok. 5°C] i nie stanowi istotnego czynnika destrukcyjnego (8). Badania Łowińskiej-Kluge (9, 10) wykazały, że duże dawki promieniowania gamma - do $1,2 \cdot 10^3$ MGy - powodują rozkład produktów hydratacji cementu i oddzielenie wody związanej chemicznie.

We współczesnych badaniach uszkodzeń betonu w polu promieniowania neutronowego intensywnie podejmowane są zagadnienia wpływu składników betonu, zwłaszcza składników mineralnych kruszyw (7). Z uwagi na zjawisko aktywacji neutronowej badania często mają charakter symulacji komputerowych (11, 12, 13). Na podstawie modelowania zmian modułu sprężystości pod wpływem promieniowania neutronowego, skorelowanych z zawartością krzemionki w kruszywie, zalecono stosowanie skał węglanowych zamiast skał magmowych do budowy biologicznej osłony nowych reaktorów (13). Rozpoznanie zjawisk związanych z degradacją betonu wskutek oddziaływania promieniowania gamma opiera się przede wszystkim na starszych danych doświadczalnych i jedynie marginalnie obejmuje efekty związane ze składnikami współczesnego betonu. Wprawdzie w pracy przeglądowej (14) zasugerowano, że odporność betonu na oddziaływanie promieniowania gamma nie zależy od składu cementu ani zastosowania dodatków mineralnych, sugestia nie została poparta solidnymi danymi doświadczalnymi. Zatem konieczne jest rozszerzenie bazy danych doświadczalnych o uszkodzeniach radiacyjnych betonu, zwłaszcza w polu promieniowania gamma, do lepszego przewidywania skutków długotrwałego napromienienia osłon betonowych.

Celem pracy jest przegląd nowych wyników badań wpływu składników betonu na zmiany jego właściwości wskutek oddziaływania promieniowania gamma. W ostatnich 5 latach nowe wyniki uzyskano m.in. w ramach realizacji międzynarodowego projektu RADCON, w którym uczestniczyły jednostki naukowe z Korei Południowej i czterech krajów Grupy Wyszehradzkiej [Węgry, Czechy, Słowacja i Polska]. Oprócz identyfikacji efektów napromienienia betonu badania objęły ważne zagadnienia technologii betonu osłonowego i składowania odpadów promieniotwórczych, takie jak ocena jednorodności i predykcja podatności na wczesne spękania termiczne w konstrukcjach masywnych.

A review of issues related to radiation-induced damage in concrete was presented by Rosseel et al. (2) and Brandt (7). The following main mechanisms of concrete degradation under radiation exposure have been identified:

- a) drying and shrinkage of the cement paste due to water radiolysis [gamma irradiation],
- b) formation of crystal lattice defects in the aggregate and its swelling [neutron irradiation].

Both mechanisms lead to cracking, loss of strength, and increased permeability of concrete. It has been found that neutron irradiation causes expansion of aggregate grains and shrinkage of the cement paste. At a fluence of $5 \cdot 10^{19}$ n/cm², the shrinkage of paste made with Portland cement is approximately 2 %, while aggregate expansion ranges from 0.1 % to 1 % (1). Concrete expansion increases with the SiO₂ content of the aggregate, which correlates with the degradation of mechanical properties. Although radiation absorption generates heat, the temperature rise in concrete is small [up to about 5 °C] and does not constitute a significant destructive factor (8). Research by Łowińska-Kluge (9, 10) showed that large gamma doses – up to $1.2 \cdot 10^3$ MGy – cause decomposition of cement hydration products and the release of chemically bound water.

In contemporary studies of concrete damage in neutron radiation fields, considerable effort is devoted to investigating the effects of concrete constituents, particularly the mineral components of aggregates (7). Due to the issue of neutron activation, the research often involves computational simulations (11, 12, 13). Based on modelling changes in the elastic modulus under neutron irradiation, correlated with silica content in aggregates, it has been recommended to use carbonate rocks rather than igneous rocks for constructing biological shields in new reactors (13). Understanding phenomena related to concrete degradation under gamma radiation relies mainly on older experimental data and only marginally covers effects associated with components of modern concrete. Although a review study (14) suggested that concrete resistance to gamma irradiation does not depend on cement composition or the use of mineral admixtures, this claim was not supported by robust experimental evidence. Therefore, expanding the experimental database on radiation-induced concrete damage – especially in gamma radiation fields – is necessary to better predict the long-term effects of irradiation on concrete shielding.

The aim of this paper is to review new research findings on how concrete constituents influence changes in its properties under gamma irradiation. Over the past five years, new results have been obtained, among others, within the international RADCON project, which involved research units from South Korea and four Visegrad Group countries [Hungary, Czechia, Slovakia, and Poland]. In addition to identifying irradiation-induced effects in concrete, the studies also addressed important issues related to shielding concrete technology and radioactive waste storage, such as assessing material homogeneity and predicting susceptibility to early thermal cracking in massive structures.

2. Zakres badań doświadczalnych

Badania w ramach projektu RADCON prowadzone były niezależnie w jednostkach naukowych pięciu krajów. Badania przeprowadzone w IPPT PAN przy współpracy z partnerami zagranicznymi i krajowymi obejmowały następujące tematy:

1. wczesne oddziaływanie promieniowania gamma na twardniejący beton,
2. wpływ promieniowania gamma na przebieg karbonatyzacji betonu i inicjację korozji stali zbrojeniowej w betonie,
3. wodatność składników betonu na aktywację strumieniem neutronów,
4. opracowanie narzędzi doświadczalno-numerycznych do oceny jednorodności betonu oraz do zapobiegania wczesnym spękanom termicznym,
5. opracowanie receptur samozagęszczalnych mieszanek betonowych osłonowych z oceną ich parcia na deskowanie.

Selekcję składników betonu osłonowego przeprowadzono kierując się przede wszystkim kryterium osłabiania promieniowania jonizującego, tj. gamma oraz neutronowego. Z zasobów krajowych i krajów ościennych wyselekcjonowano kruszywa ciężkie [barytowe 4,05–4,20 g/cm³, magnetytowe 4,80 g/cm³], kruszywo wodonośne takie jak serpentynit, kruszywo normalnej gęstości, takie jak granit, amfibolit, gabbro, kwarcyt, a także naturalne kruszywa drobne – piaski rzeczne i kopalne. Z uwagi na osłonowość neutronową wyselekcjonowano kruszywa i mineralne dodatki do betonu zawierające związki boru [uleksyt, kolemanit]. Jako spoiwo stosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R, portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 42.5 N oraz cement żuźlowy CEM III/A 42,5 N. W niektórych mieszankach jako dodatek stosowano mielony kamień wapienny i krzemionkowy popiół lotny. Do określenia właściwości kruszyw, cementów i dodatków wykorzystano normowe metody fizykochemiczne, w tym XRD, XRF, mikroskopię optyczną i skaningową, uzupełnione technikami aktywacyjnymi do określenia składu pierwiastkowego. Do badania mikrostruktury i właściwości zaprawy i betonu zastosowano metody porozymetryczne, dyfrakcję rentgenowską, mikroskopię optyczną i skaningową, mikrotomografię promieniowania X i tomografię neutronową, a także metody badań wytrzymałościowych oraz techniki mikro i nanoindentacji.

Zaprojektowano i wykonano próbki zaprawy i betonu o intencjonalnie zróżnicowanym składzie, a następnie poddano napromienieniu dawką promieniowania gamma w zakresie do 11 MGy. Jako źródła promieniowania wykorzystano wypalone paliwo jądrowe w basenie przechowawczym reaktora Maria oraz dużej mocy źródło kobaltowe ⁶⁰Co o całkowitej aktywności 4.4·10¹⁵ Bq [120 kCi]. Do badań aktywacyjnych wykorzystano techniki analizy aktywacyjnej neutronowej NAA oraz natychmiastowej analizy aktywacyjnej gamma PGAA, dostępne w Budapesztańskim Centrum Neutronowym (15, 16). Poniżej omówiono wyniki badań uzyskane w pięciu wyżej wspomnianych obszarach tematycznych na tle innych publikacji.

2. Range of experimental investigation

The studies carried out within the RADCON project were conducted independently in research institutions across five countries. The research performed at IPPT PAN, in cooperation with foreign and domestic partners, covered the following topics:

1. early effects of gamma irradiation on hardening concrete,
2. influence of gamma irradiation on the carbonation process of concrete and the initiation of corrosion in reinforcing steel,
3. susceptibility of concrete components to activation by neutron flux,
4. development of experimental–numerical tools for assessing concrete homogeneity and preventing early thermal cracking,
5. development of self-compacting shielding concrete mixtures along with evaluation of their pressure on formwork.

Selection of shielding concrete constituents was carried out primarily based on the criterion of attenuating ionizing radiation, i.e., gamma and neutron radiation. From domestic sources and neighboring countries, heavy aggregates [barite 4.05–4.20 g/cm³, magnetite 4.80 g/cm³], hydrogen-rich aggregates such as serpentinite, normal-density aggregates such as granite, amphibolite, gabbro, and quartzite, as well as natural fine aggregates—river and glacial sands—were selected. Due to neutron shielding requirements, aggregates and mineral additives containing boron compounds [ulexite, colemanite] were chosen. Portland cement CEM I 42.5 R, slag-portland cement CEM II/B-S 42.5 N, and slag cement CEM III/A 42.5 N were used as binders. In some mixtures, ground limestone and siliceous fly ash were used as additives.

To determine the properties of aggregates, cements, and additives, standard physicochemical methods were applied, including XRD, XRF, optical and scanning microscopy, supplemented by activation techniques for identifying elemental composition. To examine the microstructure and properties of mortars and concretes, porosimetry, X-ray diffraction, optical and scanning microscopy, X-ray microtomography, neutron tomography, mechanical strength testing, as well as micro- and nanoindentation techniques were used.

Samples of mortar and concrete with intentionally varied compositions were designed and produced, and then irradiated with gamma radiation doses of up to 11 MGy. Spent nuclear fuel stored in the pool of the MARIA reactor and a high-power ⁶⁰Co cobalt source with a total activity of 4.4·10¹⁵ Bq [120 kCi] were used as radiation sources. For activation studies, neutron activation analysis [NAA] and prompt gamma activation analysis [PGAA] techniques available at the Budapest Neutron Centre were employed (15, 16). The results obtained in the five thematic areas mentioned above are discussed below in the context of other publications.

3. Effects of gamma radiation on hardening cement and concrete

To immobilize low- and intermediate-level radioactive waste generated during the operation of nuclear power plants, cementation is

3. Efekty oddziaływania promieniowania gamma na twardniejący cement i beton

Do immobilizacji odpadów promieniotwórczych nisko- i średnio-aktywnych, pochodzących z eksploatacji elektrowni jądrowych, stosuje się technikę cementacji, która jest stosunkowo prosta i niedroga (17, 18). Jednakże związki chemiczne zawarte w odpadach promieniotwórczych wpływają na szybkość hydratacji cementu oraz właściwości produktów hydratacji. Na przykład, odpady boranowe o wysokim stężeniu boru stanowią problem przy ich cementacji, ponieważ rozpuszczalne borany, takie jak kwas borowy, hamują hydratację cementu (19). Zdolność immobilizacji w zaczynach cementowych wynika z ich wysokiego pH, który umożliwia wytrącanie wielu nuklidów w postaci wodorotlenków. Jednakże, ze względu na promieniowanie emitowane przez odpady promieniotwórcze, zaczyn cementowy jest poddawany napromienieniu już od wczesnego etapu wiązania cementu i dojrzenia (20). W takich warunkach przewidywana podatność na radiolizę wody indukowaną promieniowaniem gamma może być przyczyną późniejszej degradacji właściwości materiałowych.

Zaprawy cementowe napromienione promieniowaniem gamma bezpośrednio po uformowaniu wykazywały zmniejszoną wytrzymałość oraz zwiększoną porowatość (21). Przy pochłoniętych dawkach od 4 do 33 kGy utrata wytrzymałości na ściskanie wynosiła zazwyczaj 5–10%. Moment rozpoczęcia ekspozycji na promieniowanie miał duże znaczenie - wcześniejsza ekspozycja powodowała mniejszą utratę wytrzymałości, a 6-godzinne napromienienie przy mocy dawki około 2 kGy/h skutkowało nawet niewielkim zwiększeniem wytrzymałości. W pracy (22) zaobserwowano pozytywne efekty napromienienia gamma pod względem względnej zmiany masy w ciągu pierwszych 300 godzin lub przy równoważnej pochłoniętej dawce promieniowania 450 kGy. Rozbieżności w danych eksperymentalnych sugerują, że podczas napromienienia zaczynu lub zaprawy cementowej w początkowej fazie twardnienia może zachodzić jednocześnie kilka różnych zjawisk, które wymagają lepszego objaśnienia.

Zakres badań przedstawionych w pracy (23) objął kompozyty o matrycach ze spoiw o zróżnicowanym składzie chemicznym, zawierających cement portlandzki o normalnej i podwyższonej zawartości alkaliów, dodatki minerałów boronośnych: uleksyt i kolemanit, kwas borowy oraz krzemionkę w formie nanometrycznej. Próbkę mieszanek napromieniono przez 8h dawką 35-39 kGy. Po napromienieniu i zatrzymaniu dalszej hydratacji przeprowadzono badania wytrzymałości, badania mikroporowatości, składu fazowego i mikrostruktury kompozytów. Nie stwierdzono występowania uszkodzeń radiacyjnych, ale korzystne efekty wczesnego napromienienia. Stwierdzono, że ekspozycja twardniejących materiałów na promieniowanie gamma wpłynęła na zwiększenie o 50-102% wczesnej wytrzymałości na zginanie i ściskanie zapraw cementowych. Zwiększeniu wytrzymałości towarzyszyła redukcja zawartości porów kapilarnych w szczególności porów większych od 100 μm , wzrost zawartości portlandytu [rys.1]. Wyznaczony temperaturowy równoważnik wpływu promieniowania gamma,

used—a technique that is relatively simple and inexpensive (17, 18). However, chemical compounds present in radioactive waste influence the rate of cement hydration and the properties of the hydration products. For example, borate wastes with high boron content pose difficulties during cementation because soluble borates, such as boric acid, inhibit the hydration reaction (19). The immobilization capability of cement pastes results from their high pH, which enables precipitation of many nuclides in the form of hydroxides. However, due to the radiation emitted by the radioactive waste, the cement paste is exposed to irradiation from the early stages of setting and hardening (20). Under such conditions, the expected susceptibility to gamma-induced radiolysis of water may lead to subsequent degradation of material properties.

Cement mortars irradiated with gamma radiation immediately after casting showed reduced strength and increased porosity (21). For absorbed doses between 4 and 33 kGy, the loss of compressive strength typically ranged from 5–10 %. The moment at which radiation exposure began was highly significant—earlier exposure resulted in a smaller strength loss, and 6 hours of irradiation at a dose rate of about 2 kGy/h even produced a slight increase in strength. Study (22) reported positive effects of gamma irradiation with respect to relative mass change during the first 300 hours, or at an equivalent absorbed dose of 450 kGy. The discrepancies in the experimental data suggest that several different phenomena may occur simultaneously when cement paste or mortar is irradiated during the early stages of hardening, and these require better explanation.

The scope of the research presented in (23) encompassed composites with matrices made from binders of varied chemical composition, including Portland cement with normal and elevated alkali content, mineral boron-bearing additives such as ulexite and colemanite, boric acid, and nanosilica. The mixture samples were irradiated for 8 hours with a dose of 35-39 kGy. After irradiation and termination of further hydration, strength tests, microporosity measurements, phase composition analyses, and microstructural examinations of the composites were carried out. No radiation-induced damage was found, but beneficial effects of early irradiation were observed. It was determined that exposure of hardening materials to gamma radiation increased the early flexural and compressive strength of cement mortars by 50-102%. The increase in strength was accompanied by a reduction in the volume of capillary pores – particularly those larger than 100 μm – and by an increase in portlandite content [Fig. 1].

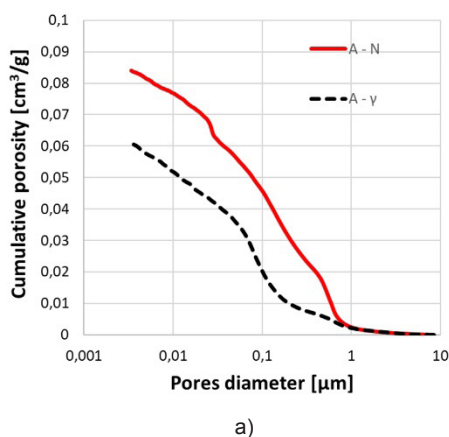
The temperature equivalent of the gamma-radiation effect, determined by comparing the strength of irradiated samples with that of samples matured at various temperatures [Fig. 2], was found to be linearly correlated with the rate of mortar hardening and corresponded to an acceleration of initial setting and a shortening of the setting time. The influence of boron-bearing components on delaying the onset of cement setting, as well as on reducing strength – which was not compensated for by the accelerating effect of gamma radiation – was demonstrated.

wyznaczony na podstawie porównania wytrzymałości próbek napromienionych i dojrzewających z zróżnicowanej temperaturze [rys. 2], okazał się skorelowany liniowo z szybkością procesu twardnienia zapraw i odpowiadał za przyspieszenia początku wiązania oraz skrócenie czasu wiązania. Wykazano wpływ składników boronośnych na opóźnienie początku czasu wiązania cementu, a także na zmniejszenie wytrzymałości, którego nie zniwelowało przyspieszające działanie promieniowania gamma.

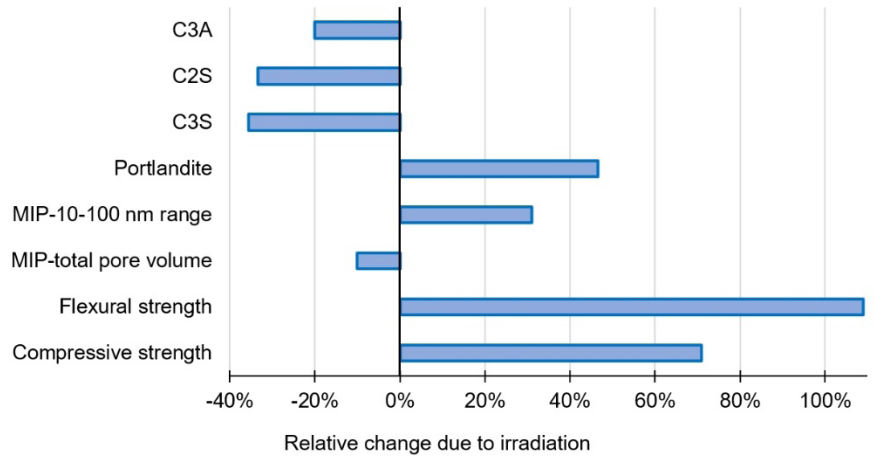
Przedmiotem kolejnej niedawnej publikacji (24) jest wpływ promieniowania gamma na moduł sprężystości betonu z kruszywem grubym o zróżnicowanym składzie mineralnym: amfibolitem oraz barytem i magnetytem. Próbki napromieniono przez 16 godzin dawką do 57 kGy. Stwierdzono istotne zwiększenie siecznego modułu sprężystości oraz zmniejszenie porowatości po 48 godzinach od wykonania i stopniowe wygaszanie efektu umocnienia po 24 dniach dojrzewania. Zaobserwowano jakościowy wpływ napromienienia na produkty hydratacji i gęstość w strefie kontaktu kruszywo-zaczyn. Wczesne napromienienie zmniejszyło zawartość porów kapilarnych w betonie, najbardziej, tj. dwukrotnie, w przypadku kruszywa magnetytowego, zwiększając jednocześnie udział dominującej grupy porów kapilarnych o rozmiarach od 0,05 do 0,2 μm [rys. 3].

Zaproponowano wzory do przewidywania modułu sprężystości przy uwzględnieniu wpływu promieniowania, związanego z efektem przyspieszenia hydratacji cementu i wzrostu sztywności warstwy kontaktowej (24). Wzrost modułu sprężystości betonu w czasie $E_c(t)$ został opisany za pomocą wzorów zaczerpniętych z FIB Model Code (25), po wprowadzeniu modyfikacji uwzględniających efekty napromieniania:

$$E_c(t) = E_{ci} \cdot \sqrt{\exp\left[(k_{\gamma 2})^{-1} \cdot s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right]} \quad [1]$$

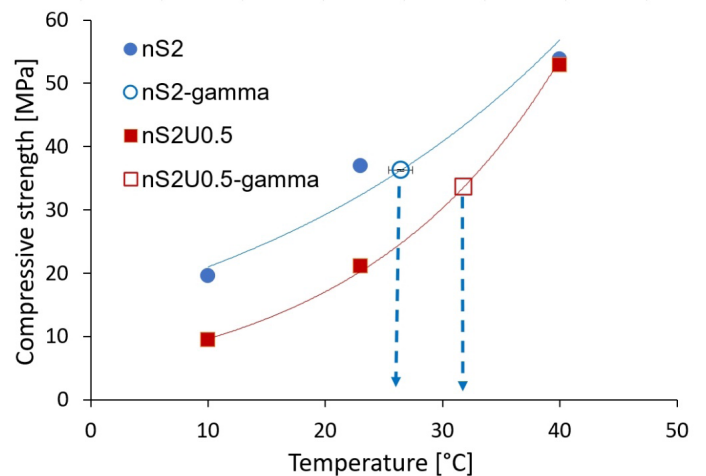


Rys. 3. Wpływ napromieniania gamma na rozkład wielkości porów w betonie z kruszywem barytowym (a) oraz z kruszywem magnetytowym (b) (24).
Fig. 3. The influence of gamma irradiation on the pore size distribution in mortar fraction of concrete with barite aggregate (a), magnetite aggregate (b) – reproduced from (24).



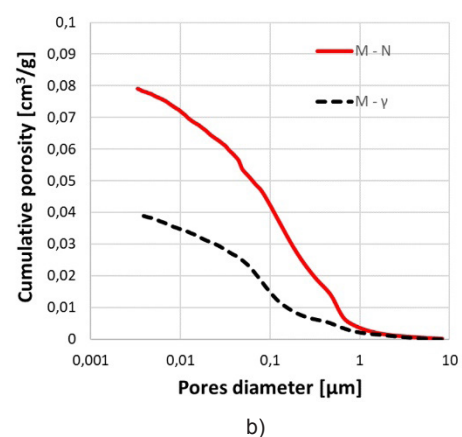
Rys. 1. Względna zmiana wytrzymałości, porowatości i składu fazowego młodej zaprawy z cementem CEM I 52.5R wywołana dawką promieniowania gamma około 40 kGy [zmiana intensywności wybranych refleksów XRD: portlandyt $d = 4,902 \text{ \AA}$, C_3S $d = 2,776 \text{ \AA}$, C_2S $d = 2,744 \text{ \AA}$, C_3A $d = 2,700 \text{ \AA}$] – na podstawie (23).

Fig. 1. Relative change of strength, porosity and phase composition of early age mortar with CEM I 52.5R induced by gamma dose of about 40 kGy [the intensity change of selected XRD reflections: Portlandite $d = 4.902 \text{ \AA}$, C_3S $d = 2.776 \text{ \AA}$, C_2S $d = 2.744 \text{ \AA}$, C_3A $d = 2.700 \text{ \AA}$] -redrawn from (23).



Rys. 2. Wpływ temperatury i napromieniania gamma na wczesną wytrzymałość na ściskanie zaprawy modyfikowanej uleksytem [U0.5] i nanokrzemionką [nS2] – na podstawie (23).

Fig. 2. Effect of temperature and gamma irradiation on the early compressive strength of mortar modified with ulexite [U0.5] and nanosilica [nS2] -redrawn from (23).



$$E_{ci} = 21500 \cdot \alpha_E \cdot k_{\gamma 1} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3} \quad [2]$$

We wzorach zastosowano standardowe oznaczenia:

f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie w wieku 28 dni,
 α_E – bezwymiarowy współczynnik uwzględniający sztywność kruszywa,

s – współczynnik zależny od klasy wytrzymałości cementu oraz szybkości jego dojrzewania,

t – wiek betonu w dniach.

Współczynniki związane z napromienianiem, $k_{\gamma 1}$ oraz $k_{\gamma 2}$, przyjęto jako odpowiadające odpowiednio za sztywność strefy kontaktu kruszywo–zaprawa oraz za przyspieszenie wczesnej hydratacji cementu. Współczynniki $k_{\gamma 1}$ i $k_{\gamma 2}$ wyznaczone dla różnych rodzajów kruszyw w betonie podano w tablicy 1. Zastosowanie tych współczynników pozwala na dokładniejsze przewidywanie rozwoju modułu sprężystości betonu poddanego napromienianiu w młodym wieku. Obserwuje się, że zarówno $k_{\gamma 1}$, jak i $k_{\gamma 2}$ maleją wraz ze wzrostem gęstości kruszywa.

Równoważność efektów oddziaływania promieniowania gamma i podwyższonej temperatury na twardniejący zaczyn cementowy została potwierdzona niedawno w pracy (26). Obserwacje sugerują, że wpływ napromienienia dotyczy głównie przyspieszenia kinetyki hydratacji cementu. Niemniej jednak w napromienianych próbkach stwierdzono mniejszą ilość wody związanej w fazie C-S-H, a zjawiska odpowiedzialne za te efekty nie zostały dotychczas wyjaśnione.

4. Karbonatyzacja betonu i inicjacja korozji stali zbrojeniowej pod wpływem promieniowania gamma

Ekspozycja na promieniowanie gamma przekraczające graniczną dawkę $2 \cdot 10^2$ MGy może prowadzić do znaczącej degradacji właściwości mechanicznych materiałów cementowych i betonu (1, 4). Jednym z możliwych powodów znacznego spękania i odprysków przy dużej mocy dawki promieniowania jest akumulacja gazów radiolitycznych prowadząca do powstania wysokiego ciśnienia w porach stwardniałego zaczynu cementowego (27). Jednak w przeciwieństwie do zaczynów z żużlem wielkopieczowym, zaczyny z popiołem lotnym nie wykazały oznak odpryskiwania ani pęka-

The subject of another recent publication (24) is the influence of gamma radiation on the modulus of elasticity of concrete with coarse aggregate of varying mineral composition: amphibolite, barite, and magnetite. The samples were irradiated for 16 hours with a dose of up to 57 kGy. A significant increase in the secant modulus of elasticity and a decrease in porosity were observed 48 hours after casting, followed by a gradual fading of the strengthening effect after 24 days of curing. A qualitative influence of irradiation on the hydration products and the density in the aggregate – paste interfacial transition zone was noted. Early irradiation reduced the content of capillary pores in the concrete – most notably [i.e., twofold] in the case of magnetite aggregate – while simultaneously increasing the proportion of the dominant group of capillary pores sized from 0.05 to 0.2 μm [Fig. 3].

Formulas were proposed to predict the modulus of elasticity, taking into account the influence of radiation associated with the accelerated cement hydration and increased stiffness of the interfacial transition zone (24). The increase in the modulus of elasticity of concrete over time, $E_c(t)$, was described using formulas taken from the FIB Model Code (25), after introducing modifications to account for irradiation effects:

$$E_c(t) = E_{ci} \cdot \sqrt{\exp \left[(k_{\gamma 2})^{-1} \cdot s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right]} \quad [1]$$

$$E_{ci} = 21500 \cdot \alpha_E \cdot k_{\gamma 1} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3} \quad [2]$$

Standard symbols were used in the formulas:

f_{cm} – mean compressive strength of concrete at 28 days,

α_E – dimensionless coefficient accounting for aggregate stiffness,

s – coefficient dependent on the cement strength class and its rate of maturation,

t – age of the concrete in days.

The coefficients associated with irradiation, $k_{\gamma 1}$ and $k_{\gamma 2}$, were assumed to represent, respectively, the stiffness of the aggregate–mortar interfacial zone and the acceleration of early cement hydration. The coefficients $k_{\gamma 1}$ and $k_{\gamma 2}$ determined for different types of aggregates in concrete are presented in Table 1. The use of these coefficients allows for more accurate prediction of the development of the modulus of elasticity in concrete subjected

Tablica 1 / Table 1

Współczynniki do prognozowania modułu sprężystości betonu poddanego wczesnemu napromienianiu gamma – na podstawie (24)

Coefficients for prediction of modulus of elasticity of concrete subjected to early gamma irradiation – based on (24)

Kruszywo / Aggregate		Właściwości betonu / Properties of concrete		Współczynniki wzoru / Coefficients		
Typ / Type	Gęstość / Density, kg/dm ³	E_{ci} , GPa	$f_{cm, cube}$, MPa	α_E	$k_{\gamma 1}$	$k_{\gamma 2}$
Amfibolit / Amphibolite	2.9	34.5	66.3	0.92	1.125	1.319
Baryt / Barite	4.2	28.9	51.1	0.84	1.107	1.289
Magnetyt / Magnetite	4.8	37.6	73.7	0.97	1.035	1.224

nia. Bouniol i in. (28) zaobserwowali, że podczas napromienienia z fazy gazowej nad próbkami znika tlen. Zjawisko to wyjaśniono wiązaniem tlenu w wyniku powstawania nadtlenu wapnia $[CaO_2]$. Interakcje pomiędzy różnymi rodnikami powstającymi w procesie radiolizy mogą powodować mikroskopowe zmiany fizyczne i zmiany składu matrycy cementowej. Stwierdzono, że zarówno wytrzymałość betonu, jak i objętość porów maleją, natomiast zawartość kalcytu wzrasta, w zależności od poziomu napromienienia γ (29). Nawet przy niższych dawkach promieniowania, sięgających tylko do 1–1,6 MGy, wyniki badań (30) wykazały, że promieniowanie przyspiesza karbonatyzację zachodzącą na drodze dyfuzji. Sformułowano hipotezę, że oprócz naturalnej karbonatyzacji zachodzi również niezależna karbonatyzacja indukowana promieniowaniem γ . Hipoteza karbonatyzacji wywołanej promieniowaniem wymaga dalszej weryfikacji. Konieczne jest również zbadanie dalszych możliwych jej konsekwencji, takich jak możliwość inicjacji korozji stali w betonie eksponowanym na promieniowanie.

Nowe wyniki badań przedstawiono w artykułach (31, 32, 33), poświęconych wpływowi promieniowania gamma na przebieg karbonatyzacji betonu oraz na właściwości betonu w otulinie zbrojenia stalowego, określające jej zdolności ochrony zbrojenia przed korozją. Jako źródło promieniowania gamma wykorzystano się pręty wypalonego paliwa jądrowego w basenie technologicznym reaktora badawczego (34). Zróżnicowanie składu zaprawy polegało na stosowaniu zróżnicowanej zawartości cementu portlandzkiego, popiołu lotnego krzemionkowego, mączki wapiennej. Próbkę w pojemnikach w środowisku o podwyższonym stężeniu CO_2 i zadanej wilgotności RH zostały poddane działaniu promieniowania gamma do 1,6-2 MGy.

Stwierdzono, że głębokość karbonatyzacji wzrasta wraz liniowo ze wzrostem pochłoniętej dawki gamma (31). Korelacja obserwowano zarówno w przypadku zaprawy bez dodatków, jak i z dodatkiem wapienia lub popiołu lotnego krzemionkowego. W wyniku ekspozycji na promieniowanie gamma w zaprawie zawierającej wapień lub popiół lotny zaobserwowano gęstą i jednorodną warstwę kalcytu, podczas gdy w zaprawie przechowywanej w warunkach laboratoryjnych wystąpiła jedynie lokalna karbonatyzacja. Potwierdzono występowanie zwiększonej zawartości kalcytu w próbkach napromienionych, nie stwierdzono natomiast obecności waterytu. Produkty karbonatyzacji były znacznie powiększone w wyniku działania promieniowania γ – kryształki kalcytu miały rozmiar ok. 15 μm , w porównaniu do 5 μm w próbkach nienapromienionych. Promieniowanie gamma znacznie poprawiło właściwości mikro-mechaniczne produktów karbonatyzacji [rys. 4] – twardość kalcytu wzrosła od 6 do 6,5 raza, a jego moduł sprężystości wzrósł o 15-55%. Mikro-mechaniczne właściwości kalcytu powstałego pod wpływem promieniowania gamma nie były wcześniej opisywane. Zaobserwowane zwiększenie zasięgu karbonatyzacji potwierdziło jakościowo rezultaty znane z publikacji (29) i (35).

W pracy (32) wykazano, że dawka promieniowania gamma do 2 MGy ma istotny wpływ na właściwości warstwy pasywnej stali w zaprawie cementowej – stwierdzono spadek potencjału korozyjnego i potencjału pasywacji [rys. 5]. Zanotowano zwiększe-

to irradiation at an early age. It is observed that both $k_{\gamma 1}$ and $k_{\gamma 2}$ decrease with increasing aggregate density.

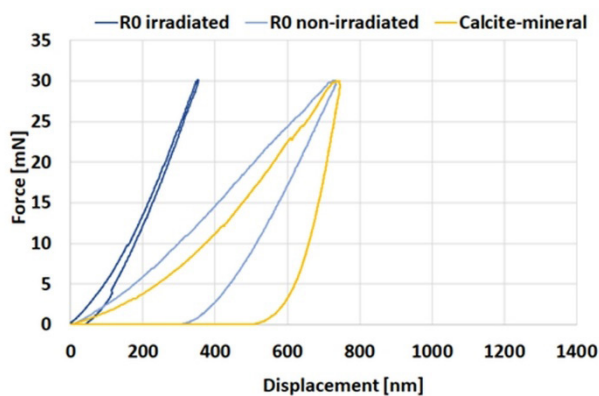
The equivalence of the effects of gamma radiation and elevated temperature on hardening cement paste was recently confirmed in study (26). Observations suggest that the influence of irradiation mainly concerns the acceleration of cement hydration kinetics. Nevertheless, in irradiated samples, a lower amount of water bound in the C-S-H phase was found, and the phenomena responsible for these effects have not yet been explained.

4. Carbonation of concrete and initiation of steel reinforcement corrosion under the influence of gamma radiation

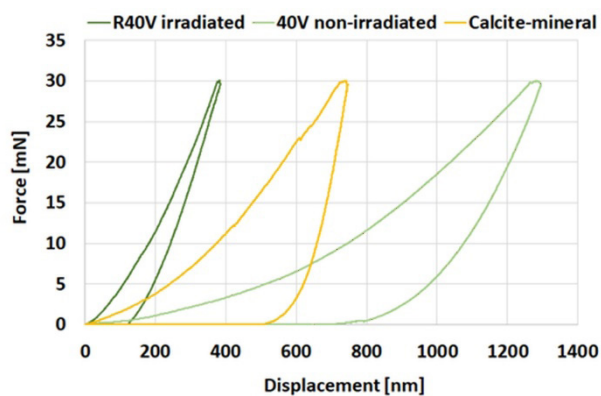
Exposure to gamma radiation exceeding the threshold dose of $2 \cdot 10^2$ MGy can lead to significant degradation of the mechanical properties of cementitious materials and concrete (1, 4). One possible reason for extensive cracking and spalling at high radiation dose rates is the accumulation of radiolytic gases, leading to high pressure in the pores of the hardened cement paste (27). However, unlike slag-based pastes, fly ash-based pastes showed no signs of spalling or cracking. Bouniol et al. (28) observed that during irradiation, oxygen disappears from the gas phase above the samples. This phenomenon was explained by the binding of oxygen due to the formation of calcium peroxide $[CaO_2]$. Interactions between various radicals formed during radiolysis may cause microscopic physical changes and alterations in the composition of the cement matrix. It has been found that both concrete strength and pore volume decrease, while calcite content increases, depending on the level of γ -irradiation (29). Even at lower radiation doses, reaching only 1–1.6 MGy, studies (30) have shown that radiation accelerates diffusion-driven carbonation. A hypothesis was formulated stating that, in addition to natural carbonation, an independent carbonation induced by γ -radiation also occurs. The hypothesis of radiation-induced carbonation requires further verification. It is also necessary to investigate its possible consequences, such as the potential initiation of steel corrosion in concrete exposed to radiation.

New research findings have been presented in articles (31, 32, 33), devoted to the influence of gamma radiation on the course of concrete carbonation and on the properties of concrete in the reinforcement cover, determining its ability to protect steel against corrosion. Spent nuclear fuel rods in the reactor's technological pool were used as the source of gamma radiation (34). Variations in mortar composition involved the use of different proportions of Portland cement, siliceous fly ash, and limestone powder. Samples in containers, placed in an environment with elevated CO_2 concentration and controlled relative humidity [RH], were subjected to gamma radiation up to 1.6-2 MGy.

It was found that the depth of carbonation increases linearly with the absorbed gamma dose (31). This correlation was observed both for mortars without additives and for mortars containing limestone



a)



b)

Rys. 4 Nanoindentacja kalcytu: zależność obciążenie–przeszczenie dla kalcytu jako minerału oraz kalcytu w zaprawie napromienionej i nienapromienionej a) bez dodatków mineralnych, b) z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego – z (31).

Fig. 4. Nanoindentation test on calcite: load–displacement relationship for calcite as a mineral and for calcite in irradiated and non-irradiated mortar a) without mineral additions, b) with siliceous fly ash addition [reproduced from (31), with permission from Springer Nature].

nie gęstości prądu korozyjnego o rząd wielkości pod wpływem promieniowania gamma. Nie stwierdzono istotnego wpływu dodatku wapienia na inicjację korozji stali, natomiast zwiększenie zawartości popiołu lotnego w zaprawach napromienionych powodowało niewielki wzrost szybkości korozji stali. Pomiar metodą spektroskopii impedancji elektrochemicznej wykazały spadek impedancji oraz przesunięcie fazowe ku mniejszym wartościom dla niskich częstotliwości prądu w zaprawie ze zbrojeniem stalowym po napromienieniu gamma. Obserwacje sugerują pogorszenie właściwości ochronnych warstwy pasywnej. Podobne wyniki badań nie były wcześniej publikowane.

Napromienienie zapraw z prętami stalowymi spowodowało trzykrotny wzrost pojemności warstwy podwójnej w stosunku do próbek nienapromienionych, przechowywanych w warunkach wilgotności względnej otoczenia ok. 50% (33). Fizyczna interpretacja tego zjawiska wskazuje na zwiększenie grubości elektrycznej warstwy podwójnej, a w konsekwencji utratę stabilności warstwy pasywnej oraz rozpuszczanie żelaza (36). W przypadku zaprawy całkowicie nasyconej wilgocią zaobserwowano odwrotną zależność – zmniejszenie pojemność warstwy podwójnej o około 15-30% wskutek napromienienia. Wyniki pomiarów wskazują na zmniejszenie jednorodności warstwy pasywnej na stali, a tym samym pogorszenia jej właściwości ochronnych przy ekspozycji na promieniowanie gamma w warunkach otoczenia RH = 50%. W wyniku napromienienia stwierdzono wzrost o 5-20% objętości porów kapilarnych w zaprawie cementowej, a na podstawie danych z desorpcji azotu – stwierdzono wzrost o około 10% objętości mezoporów o średnicy do 20 nm (33). Chociaż są to zmiany niewielkie, w zakresie dawki promieniowania do 2 MGy obserwowany trend obniżenia właściwości ochronnych otuliny jest spójny. Niezbędne jest rozszerzenie zakresu rozpoznania tych zależności przy większych dawkach promieniowania, ale nadal mniejszych od dawki $2 \cdot 10^2$ MGy uznawanej za dawkę graniczną.

Inne badania nad korozją stali prowadzono w warunkach symulowanego oddziaływania promieniowania gamma przez wprowadzenie ozonu jako symulowanego utleniacza w środowisku o kontro-

or siliceous fly ash. As a result of gamma irradiation, a dense and homogeneous layer of calcite was observed in mortars containing limestone or fly ash, whereas mortars stored under laboratory conditions exhibited only localized carbonation. An increased calcite content was confirmed in irradiated samples, while no vaterite was detected. The carbonation products were significantly enlarged due to γ -irradiation – the calcite crystals reached a size of approx. 15 μm , compared to 5 μm in non-irradiated samples. Gamma irradiation significantly increased the micromechanical properties of the carbonation products [Fig. 4]: calcite hardness increased by a factor of 6 to 6.5, and its modulus of elasticity increased by 15-55%. The micromechanical properties of calcite formed under the influence of gamma irradiation had not previously been described. The observed increase in the extent of carbonation qualitatively confirmed the results reported in publications (29) and (35).

It was demonstrated in (32) that gamma irradiation up to 2 MGy had a significant impact on the properties of the passive layer of steel in cement mortar—both the corrosion potential and passivation potential were found to decrease [Fig. 5]. An order-of-magnitude increase in corrosion current density was observed under gamma irradiation. No significant effect of limestone addition on the initiation of steel corrosion was identified; however, increasing the fly ash content in irradiated mortars caused a slight increase in the corrosion rate of steel. Electrochemical impedance spectroscopy measurements showed a decrease in impedance and a phase shift towards lower values at low current frequencies in mortar with steel reinforcement after gamma irradiation. The findings suggest a deterioration in the protective properties of the passive layer. Similar research results had not been published previously.

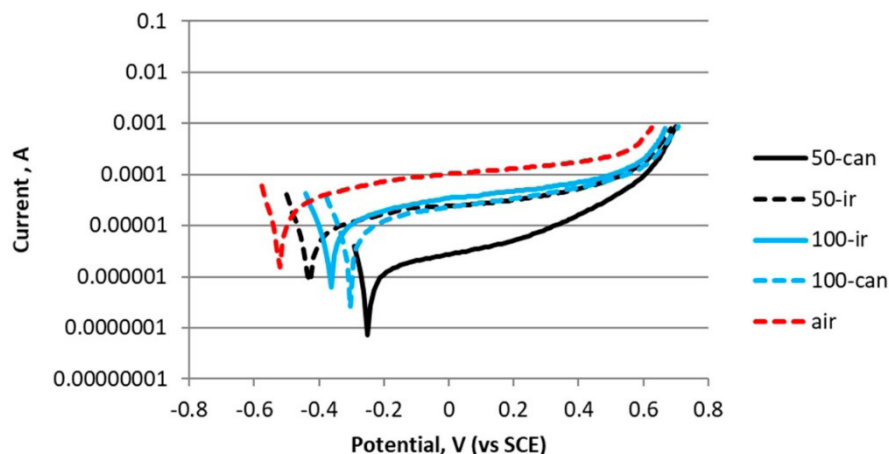
Irradiation of mortars containing steel bars caused a threefold increase in the capacity of the electrical double layer compared to non-irradiated samples stored at an ambient relative humidity of approximately 50% (33). The physical interpretation of this phenomenon indicates an increase in the effective thickness of the double layer and, consequently, a loss of stability of the passive layer and dissolution of iron (36). In the case of mortars

lowanej wilgotności w temperaturze 50°C (37). Stosując czujniki do monitorowania korozji atmosferycznej ACM [z ang. Atmospheric Corrosion Monitor] stwierdzono, że prąd korozyjny wzrastał wraz z wilgotnością, a we wszystkich warunkach wilgotności ozon miał znaczny wpływ na przyspieszenie korozji. Zauważono również, że przez wprowadzenie ozonu można uzyskać jeszcze większą szybkość korozji niż przy mocy dawki promieniowania 4,4 kGy/h. Uważa się, że utleniacze powstające w wyniku radiolizy wody mogą znacznie przyspieszać proces korozji stali, niemniej szczegółowe rozpoznanie zagadnienia wymaga jeszcze dalszych badań.

5. Aktywacja składników betonu strumieniem neutronów

Neutrony emitowane ze zbiornika reaktora mogą nie tylko powodować uszkodzenia strukturalne materiałów zbiornika i jego betonowej obudowy, ale także ich aktywację. Aktywacja neutronowa betonu to proces, w którym stabilne izotopy pierwiastków w składnikach betonu pochłaniają neutrony emitowane w trakcie pracy reaktora jądrowego, wskutek czego przekształcają się w izotopy promieniotwórcze. W ten sposób składniki betonu, które same w sobie nie są promieniotwórcze, mogą stać się źródłem promieniowania jonizującego po ekspozycji na strumień neutronów. Racjonalne jest, aby skład betonu w obudowie projektować tak, aby ograniczać aktywację jego składników w trakcie eksploatacji, co ma wpływ na bezpieczeństwo personelu i koszty demontażu elektrowni. Zgodnie z zasadą „ALARA” [z ang. as low as reasonably achievable - tak nisko, jak jest to rozsądnie osiągalne], aktywację neutronową należy minimalizować poprzez odpowiedni dobór składników mieszanki betonowej (38). Uważa się, że kruszywa mineralne w największym stopniu wpływają na zawartość pierwiastków śladowych w betonie, odpowiedzialnych za powstawanie izotopów promieniotwórczych (39). W kontekście aktywacji neutronowej szczególną uwagę zwraca się na zawartość pierwiastków ziem rzadkich, których produkty rozpadu mają długi okres półtrwania. Z perspektywy ochrony radiologicznej należy ograniczać emisję promieniowania gamma, ponieważ cząstki alfa i beta mają krótki zasięg.

Uzyskane wyniki analizy aktywacyjnej PGAA (40) wskazują na obecność w cementach portlandzkich następujących pierwiastków [w kolejności malejącej]: Ca, Fe, K, Zn, Sr, Ba, Cr, Rb, Ce, La, Co, Sb, Sc, Br, Th, As, Sm, Hf, Cs, Yb, w ilości > 1 mg/kg. W składzie cementu wapniowo-siarczanoglinianowego stwierdzono obecność następujących pierwiastków [w kolejności malejącej]: Ca, Fe, Sr, Zn, Sn, Ba, Cr, Sb, Ce, Co, Nd, La, W, Br, Hf, Sm, Th, Yb, Sc w ilości > 1 mg/kg. Pierwiastki Eu, Ta, Tb występują w spoiwach w ilości 0,2–0,8 mg/kg. W składzie kruszywa granitowego stwierdzono obecność następujących pierwiastków [w kolejności malejącej]: K, Na, Cr, Ba, Zr, Rb, Ce, La, Zn, Th, Cs, Hf, Sc, Sm, Yb, Co, Ta,



Rys. 5 Krzywe polaryzacji dla pręta stalowego zabetonowanego w zaprawie cementowej [50 lub 100 – wilgotność względna środowiska, *ir* – próbka napromieniona, *can* – próbka umieszczona w puszcze w komorze klimatycznej, *air* – próbka referencyjna w standardowych warunkach laboratoryjnych] (33).

Fig. 5. Polarization curves for a steel bar embedded in cement mortar [50 or 100 – relative humidity of the environment; *ir* – irradiated sample; *can* – sample placed in a sealed container in a climatic chamber; *air* – reference sample in standard laboratory conditions] [reproduced from (33), licensed under CC BY].

fully saturated with moisture, the opposite trend was observed – a decrease in double-layer capacity by approximately 15–30 % as a result of irradiation. Measurement results indicate a reduction in the homogeneity of the passive layer on the steel, and thus a deterioration of its protective properties when exposed to gamma irradiation under ambient conditions of RH = 50 %. Irradiation also resulted in a 5–20 % increase in the volume of capillary pores in the cement mortar, and nitrogen desorption data showed an approximately 10 % increase in the volume of mesopores with diameters up to 20 nm (33). Although these changes are small, within the irradiation dose range up to 2 MGy the observed trend of declining protective properties of the concrete cover is consistent. It is necessary to extend the scope of these investigations to higher irradiation doses, although still lower than the threshold dose of $2 \cdot 10^2$ MGy.

Other studies on steel corrosion were conducted under simulated gamma-radiation exposure by introducing ozone as a surrogate oxidizing agent into an environment with controlled humidity at 50 °C (37). Using ACM [Atmospheric Corrosion Monitor] sensors, it was found that corrosion current increased with humidity, and under all humidity conditions ozone had a significant accelerating effect on corrosion. It was also noted that by introducing ozone, an even higher corrosion rate could be achieved than that resulting from a radiation dose rate of 4.4 kGy/h. It is believed that oxidizing species formed during water radiolysis can significantly accelerate steel corrosion; however, detailed understanding of this issue still requires further research.

5. Neutron activation of concrete constituents

Neutrons emitted from the reactor vessel can not only cause structural damage to the materials of the vessel and its concrete

Tablica 2 / Table 2

Zawartość radioizotopów [ppm] w cemencie powstałych wskutek aktywacji neutronowej NAA, uszeregowanych według wzrastającego okresu półtrwania (42).

Table 2. Content of radioisotopes [ppm] in cement induced by neutron activation NAA, arranged in order of increasing half-life (42).

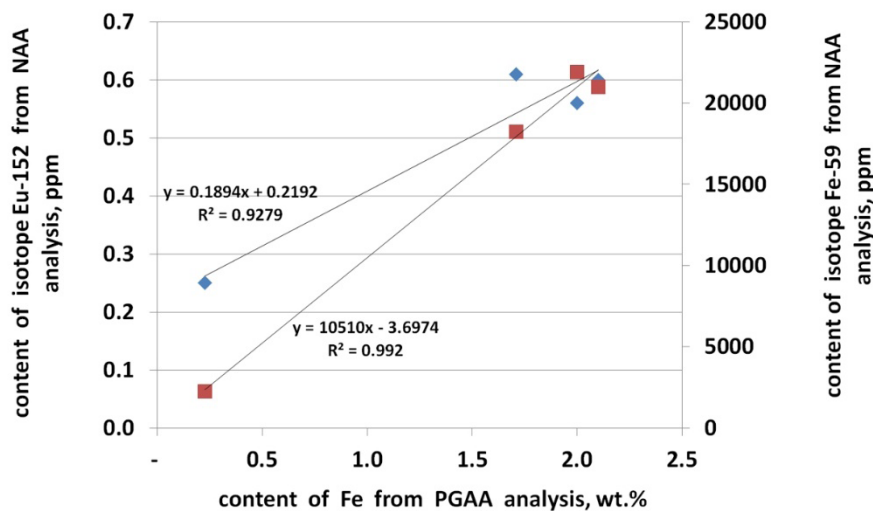
Radioizotop / Isotope	Okres półtrwania, dni Half-life, days	Rodzaj cementu / Cement type [*]			
		C1	C2	C3	C4
K-42	0.5	3 787.00	8 525.00	9 079.00	891.00
Zn-69m	0.6	558.50	845.30	401.80	16.56
As-76	1.1	5.27	4.45	12.84	0.80
Br-82	1.5	17.02	5.41	10.02	0.00
La-140	1.7	15.14	16.35	15.12	7.57
Sm-153	1.9	1.97	2.30	1.92	0.80
Yb-175	4.2	1.18	1.19	1.15	0.55
Ca-47	4.5	491 900.00	484 800.00	483 800.00	465 300.00
Nd-147	11.0	16.30	0.00	15.59	0.00
Ba-131	11.5	291.70	185.90	185.50	112.40
Rb-86	18.6	45.21	38.82	40.94	0.00
Cr-51	27.7	62.35	111.10	104.10	16.00
Ce-141	32.5	31.54	26.65	33.49	8.72
Hf-181	42.4	1.82	2.25	2.38	0.99
Fe-59	44.5	18 250.00	21 910.00	21 000.00	2 261.00
Sb-124	60.2	8.18	8.56	13.08	0.52
Sr-85	64.9	1 057.00	827.30	810.10	1 253.00
Tb-160	72.3	0.38	0.36	0.40	0.16
Sc-46	83.8	6.03	5.93	5.66	1.29
Ta-182	114.4	0.40	0.53	0.47	0.14
Cs-134	751.9	3.40	1.63	1.69	0.00
Co-60	114.4	7.93	10.44	11.30	1.79
Eu-152	4941.0	0.61	0.56	0.60	0.25

*) C1 – CEM I 42.5R, alkali content 0.56 % Na₂O_{eq}; C2 – CEM I 52.5R, alkali content 0.88 % Na₂O_{eq}; C3 – CEM I 42.5R, alkali content 1.12 % Na₂O_{eq}; C4 – CEM I 52.5R, alkali content 0.23 % Na₂O_{eq}, low content of Fe₂O₃ 0.3% [white]; C1 and C2 – produced in Poland

Tb, Tm. Dane o składzie materiałów przekazanych z Polski oraz z innych krajów uczestników RADCON stanowią bazę danych zgromadzoną w Budapeszcie (41) i wykorzystywaną do dalszych analiz i budowania modeli numerycznych.

Ocenę zawartości długożyciowych radioizotopów indukowanych promieniowaniem neutronowym w kruszywie drobnym i grubym, w różnych cementach portlandzkich potencjalnie użytecznych do wykonania konstrukcji osłonowych w elektrowniach jądrowych przedstawiono w (41, 42). Zidentyfikowano występowanie trzech głównych długożyciowych radioizotopów: ¹⁵²Eu, ⁶⁰Co i ¹³⁴Cs [Tabl. 2]. Jak pokazano na Rys.6, zawartość kobaltu-60 była proporcjonalna do zawartości alkaliów w cemencie, zawartość europu-152 była proporcjonalna do całkowitej zawartości Fe, (Fe²⁺ i Fe³⁺, Fe₂O₃). Wśród badanych kruszyw grubych największą zawartością izotopów ⁶⁰Co i ¹⁵²Eu charakteryzowały się szarogłaz i melafir - odpowiednio 16-23 ppm i 1,4-2,6 ppm. Zawartość tych radioizotopów w granitach była 5-7 razy mniejsza. Najmniejsze stężenie ⁶⁰Co i ¹⁵²Eu spośród wszystkich kruszyw grubych stwierdzono w wapieniu (0,20 ppm i 0,05 ppm), nieznacznie większe w kruszywie barytowym (0,77 ppm dla ⁶⁰Co i 0,38 ppm dla ¹⁵²Eu). Kruszywo drobne zawierało znacznie mniej powyższych radioizotopów w po-

containment but also lead to their activation. Neutron activation of concrete is a process in which stable isotopes of elements present in concrete components absorb neutrons emitted during the operation of a nuclear reactor and consequently transform into radioactive isotopes. In this way, components of concrete that are not radioactive by themselves may become sources of ionizing radiation after exposure to a neutron flux. It is therefore reasonable to design the composition of containment concrete in such a way as to limit the activation of its components during operation, which affects personnel safety and the cost of decommissioning the power plant. According to the "ALARA" principle [as low as reasonably achievable], neutron activation should be minimized through an appropriate selection of concrete mix components (38). Mineral aggregates are considered to have the greatest influence on the content of trace elements in concrete responsible for the formation of radioactive isotopes (39). In the context of neutron activation, particular attention is paid to the content of rare earth elements, whose decay products have long half-lives. From the perspective of radiological protection, gamma radiation emission should be minimized because alpha and beta particles have short ranges.



Rys. 6. Wpływ zawartości Fe w cemencie na stężenie radioizotopów Eu-152 i Fe-59 w betonie po aktywacji neutronowej (42).

Fig. 6. The influence of Fe content in cement on the concentration of Eu-152 and Fe-59 radioisotopes in concrete after neutron activation [reproduced from (42), licensed under CC BY].

równaniu z kruszywem grubym. Zauważa się różnice wynikające z pochodzenia piasku kwarcowego – nieco większe stężenie ^{60}Co i ^{152}Eu wykazały piaski kopalne w porównaniu z piaskami rzecznyymi.

6. Ocena jednorodności mikrostruktury betonu oraz predykcja wczesnych spękań termicznych

Niezbędna grubość obudowy reaktora i innych osłon radiologicznych w energetyce jądrowej zależy od rodzaju promieniowania, jego energii i pożądanego poziomu jego osłabienia. Liniowy współczynnik osłabienia dla danej energii fotonu jest proporcjonalny do gęstości betonu. Projektując skład betonu na osłony radiologiczne celowo powiększa się jego gęstość, przede wszystkim przez selekcję kruszyw ze skał o dużej gęstości (43, 44). Mieszanki betonu ciężkiego, osiągające gęstość 3000–4000 kg/m³, mają jednak większą skłonność do segregacji, co może skutkować niejednorodnością rozkładu ziaren w betonie i w konsekwencji niejednorodnością gęstości materiału w przekroju osłony. Segregacja ziaren i ewentualne pustki pod ziarnami powstałe wskutek sedimentacji mogą powodować lokalne przestrzały promieniowania. Podobnie negatywnego wpływu na właściwości osłon można oczekiwać na skutek spękań termicznych, wywołanych nadmiernym gradientem temperatury w twardniejącym betonie, zwłaszcza w konstrukcjach masywnych (45). Powyższe spostrzeżenia były motywem podjęcia prac w kierunku opracowania nowych, adekwatnych narzędzi numeryczno-eksperymentalnych.

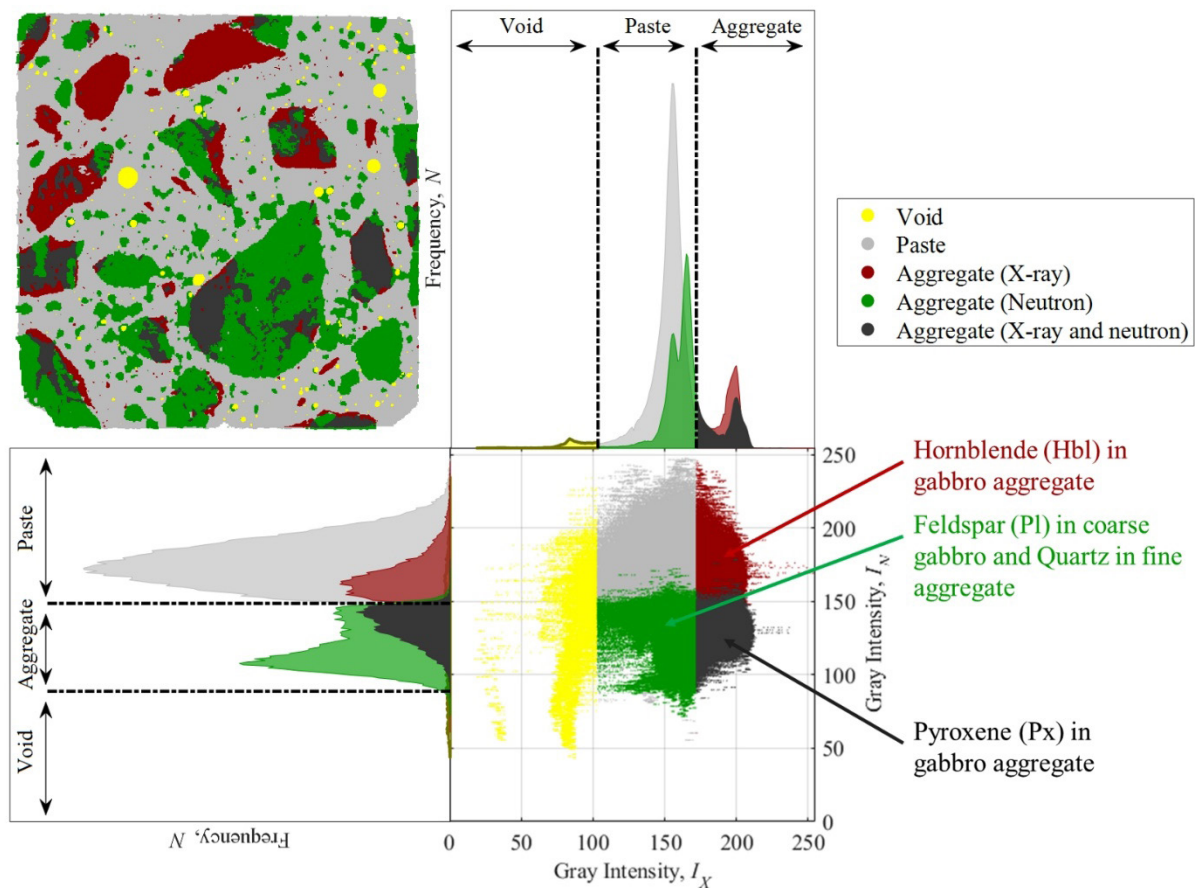
Komplementarne wykorzystanie obrazowania neutronowego i mikrotomografii rentgenowskiej pozwoliło na ulepszone rozpoznanie rozmieszczenia ziaren kruszywa w betonie (46). Opracowano metodykę segmentacji obrazu i redukcji szumów. Opracowana procedura rekonstrukcji mikrostruktury z powodzeniem odzwierciedla pustki, polimieralne ziarna kruszywa i zaczyn cementowy.

PGAA activation analysis results (40) indicate the presence of the following elements [in decreasing order] in Portland cements, in amounts > 1 mg/kg: Ca, Fe, K, Zn, Sr, Ba, Cr, Rb, Ce, La, Co, Sb, Sc, Br, Th, As, Sm, Hf, Cs, Yb. In calcium sulfoaluminate cement, the following elements were identified [in decreasing order], in amounts > 1 mg/kg: Ca, Fe, Sr, Zn, Sn, Ba, Cr, Sb, Ce, Co, Nd, La, W, Br, Hf, Sm, Th, Yb, Sc. Elements Eu, Ta, and Tb occur in binders in quantities of 0.2–0.8 mg/kg. In granite aggregate, the following elements were detected [in decreasing order]: K, Na, Cr, Ba, Zr, Rb, Ce, La, Zn, Th, Cs, Hf, Sc, Sm, Yb, Co, Ta, Tb, Tm. Data on the composition of materials provided from Poland and other countries participating in RADCON form a database stored in Budapest (41), used for further analyses and for building numerical models.

An assessment of the content of long-lived radioisotopes induced by neutron radiation in fine and coarse aggregates, as well as in various Portland cements potentially useful for constructing shielding structures in nuclear power plants, is presented in (41, 42). Three main long-lived radioisotopes were identified: ^{152}Eu , ^{60}Co , and ^{134}Cs [Table 2]. As shown in Fig. 6, the content of cobalt-60 was proportional to the alkali content in the cement, and the content of europium-152 was proportional to the total Fe content [Fe^{2+} and Fe^{3+} , Fe_2O_3]. Among the tested coarse aggregates, greywacke and melaphyre were characterized by the highest contents of ^{60}Co and ^{152}Eu – 16–23 ppm and 1.4–2.6 ppm, respectively. The content of these radioisotopes in granites was 5–7 times lower. The lowest concentrations of ^{60}Co and ^{152}Eu among all coarse aggregates were found in limestone [0.20 ppm and 0.05 ppm], with slightly higher values in barite aggregate [0.77 ppm for ^{60}Co and 0.38 ppm for ^{152}Eu]. Fine aggregate contained significantly less of these radioisotopes compared to coarse aggregate. Differences related to the origin of quartz sand were observed – fossil sands showed slightly higher concentrations of ^{60}Co and ^{152}Eu compared to river sands.

6. Assessment of microstructure homogeneity and prediction of early thermal cracking

The required thickness of the reactor containment and other radiological shields in nuclear power engineering depends on the type of radiation, its energy, and the desired level of attenuation. The linear attenuation coefficient for a given photon energy is proportional to the density of the concrete. When designing concrete mixes for radiological shielding, the density is intentionally increased, primarily by selecting aggregates from high-density rocks (43, 44). However, heavy-weight concrete mixes reaching densities of 3000–4000 kg/m³ are more prone to segregation, which may result



Rys. 7. Komplementarność tomografii rentgenowskiej i neutronowej: przykład mikrostruktury betonu oraz odpowiadające jej poziomy szarości na obrazach rentgenowskich i neutronowych (46).

Fig. 7. Complementarity of X-ray and neutron tomography: (a) example of concrete microstructure, and (b) corresponding gray intensities of X-ray and neutron images [reproduced from (46), licensed under CC BY-NC-ND].

Kruszywo drobne stanowił piasek kwarcowy, który na obrazach rentgenowskich ma poziom szarości podobny do zaczynu cementowego, dlatego jego identyfikacja opierała się głównie na obrazach neutronowych. Ziarna kruszywa grubego gabbrowego, zbudowane z różnych minerałów, głównie plagioklazów, piroksenów i hornblendy, wykazywały zmienny współczynnik osłabienia promieniowania rentgenowskiego. Plagioklasy trudno rozróżnić w obrazach rentgenowskich, natomiast tomografia neutronowa dobrze je odróżnia od zaczynu dzięki różnicom w zawartości wodoru. Minerale o większej gęstości, jak hornblenda i pirokseny, są lepiej widoczne za pomocą mikrotomografii rentgenowskiej. Połączenie obu metod umożliwia precyzyjną segmentację złożonych, wielofazowych ziaren kruszywa [rys. 7]. Dzięki temu wyznaczony udział objętościowy kruszywa grubego w betonie był zgodny z recepturą mieszanki.

Wykorzystując komputerowy obraz mikrostruktury betonu, zrekonstruowanej w opisany sposób, przeprowadzono analizę rozkładu odkształcenia w przekroju elementu betonowego poddanego jednoosiowemu rozciąganiu (46). Obliczenia przeprowadzone metodą elementów skończonych wykazały koncentrację naprężenia i lokalizację odkształcenia w miejscach uwidocznionych dopiero przy łącznym zastosowaniu obrazów z tomografii rentgenowskiej i neutronowej (Rys.8). Przeprowadzona analiza rozkładu wielkości mikroporów powietrznych w betonie wykazała małą przydatność tomografii neutronowej ze względu na niedostateczną rozdziel-

in a non-uniform distribution of aggregate grains and consequently non-uniform material density across the shield cross-section. Grain segregation and possible voids beneath aggregate particles formed due to sedimentation may cause local radiation streaming. Similarly negative effects on shielding performance may arise from thermal cracking induced by excessive temperature gradients in hardening concrete, especially in massive structures (45). These observations were the motivation for developing new, adequate numerical-experimental tools.

Complementary use of neutron imaging and X-ray microtomography enabled improved characterization of aggregate grain distribution in concrete (46). A methodology for image segmentation and noise reduction was developed; the reconstruction procedure successfully reflects voids, polymineral aggregate grains, and cement paste. The fine aggregate was quartz sand, which shows a grayscale level on X-ray images similar to cement paste, therefore its identification relied mainly on neutron images. The coarse gabbro aggregate, composed of various minerals - mainly plagioclases, pyroxenes, and hornblende - exhibited variable X-ray attenuation. Plagioclases are difficult to distinguish in X-ray images, whereas neutron tomography differentiates them well from cement paste due to differences in hydrogen content. Minerals with higher density, such as hornblende and pyroxenes, are better visible using X-ray microtomography. Combining both methods enables precise

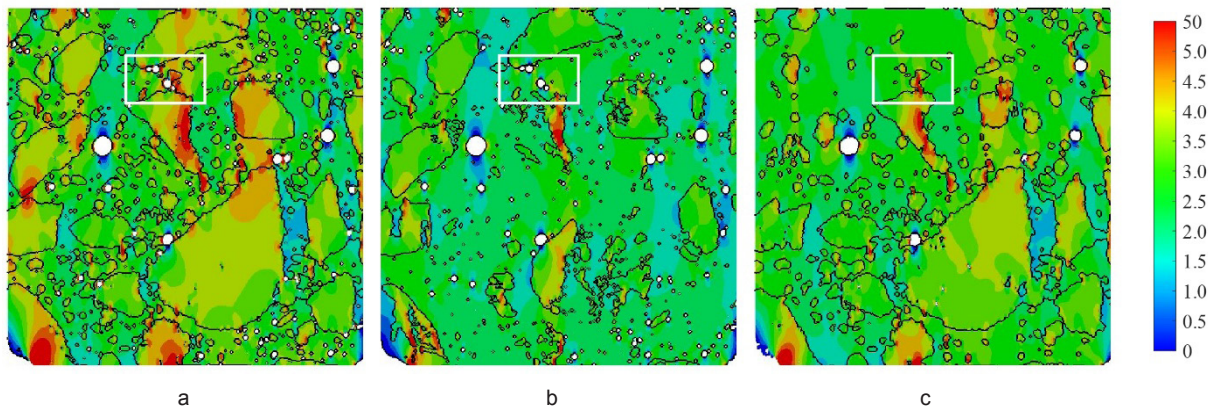


Fig. 8. Rozkład naprężeń normalnych w przekroju próbki poddanej jednoosiowemu rozciąganiu, wyznaczony na obrazie mikrostruktury betonu, uzyskany z (a) tomografii rentgenowskiej i neutronowej łączonej, (b) tomografii rentgenowskiej oraz (c) tomografii neutronowej (46).

Fig. 8. Normal stress distribution in the cross section of specimen under the uniaxial tension, determined using the concrete microstructure image obtained from the (a) combined X-ray and neutron CT, (b) X-ray CT, and (c) neutron CT [reproduced from (46), licensed under CC BY-NC-ND].

czość obrazowania. Dalszy postęp komputerowego obrazowania mikrostruktury betonu udokumentowano w pracy doktorskiej (47), uzyskując obrazy warstw przejściowych między kruszywem i zaczynem. Wykorzystując kohezyjny model pęknięcia wykazano możliwość przewidywania inicjacji i rozwoju pęknięć z strefie przejściowej. Wspomniane powyżej postępy metodyki komputerowego obrazowania cyfrowego umożliwiają lepsze uchwycenie zmienności i złożoności mikrostruktury betonu, a w konsekwencji do lepszej oceny jednorodności w kontekście oddziaływania promieniowania.

Prognozowanie pól temperatury we wczesnym okresie dojrzewania betonu pozwala sterować procesem budowy poprzez ograniczenie różnic temperatury i ich maksymalnych wartości. W tym celu coraz częściej stosuje się analizę numeryczną, w której parametry materiałowe określa się eksperymentalnie. Trudność w modelowaniu wynika ze zmiennych w czasie i przestrzeni właściwości termicznych betonu, które zależą od postępu hydratacji i zmian mikrostruktury. W pracy (48) zastosowano metodę analizy odwrotnej problemu przewodzenia ciepła, wykorzystując algorytmy ewolucyjne do identyfikacji właściwości termofizycznych betonu na podstawie pomiarów temperatury w specjalnie opracowanym urządzeniu badawczym (48). W podejściu tym modelowanie ciepła hydratacji cementu wspomagane jest krzywymi Béziera, a optymalizację numeryczną przeprowadza się metodą elementów skończonych. Zaproponowana metoda identyfikacji właściwości termofizycznych dojrzewającego betonu została zastosowana do analizy mieszanek betonu ciężkiego, z kruszywem barytowym lub magnetytowym. Nowatorskie wykorzystanie krzywych Béziera do opisu funkcji źródła ciepła okazało się skutecznym podejściem w analizie odwrotnej problemu w szerokim spektrum szybkości wydzielania ciepła podczas hydratacji, charakterystycznego dla cementów o zróżnicowanym składzie CEM I, CEM II/B-V, CEM III/A. Dzięki lepszemu określeniu funkcji źródła ciepła uzyskano dokładniejsze odwzorowanie procesów cieplnych, otrzymując narzędzie do doświadczalno-obliczeniowego prognozowania temperatury w twardniejącym betonie. W modelu nie jest jeszcze uwzględniony wpływ promieniowania na przyspieszenie hydratacji cementu, co byłoby pożądane w kontekście techniki cementacji

segmentation of complex, multiphase aggregate grains [Fig. 7]. As a result, the determined volume fraction of coarse aggregate in the concrete was consistent with the mix design.

Using the computer-generated image of the concrete microstructure reconstructed in the manner described above, an analysis of the strain distribution in the cross-section of a concrete element subjected to uniaxial tension was carried out (46). Finite element calculations revealed stress concentration and strain localization in areas identifiable only through the combined use of X-ray and neutron tomography images [Fig. 8]. The analysis of the distribution of air micropores in the concrete showed that neutron tomography is of limited usefulness due to insufficient imaging resolution. Further advances in computer-based imaging of concrete microstructure were documented in a doctoral dissertation (47), which produced images of the interfacial transition zones between aggregate and cement paste. Using a cohesive crack model, the initiation and development of cracks in the transition zone were shown to be predictable. The methodological advances in digital microstructural imaging mentioned above enable improved capture of the variability and complexity of concrete microstructure and, consequently, lead to better assessment of homogeneity in the context of radiation interaction.

Prediction of temperature fields in the early stages of concrete hardening makes it possible to control the construction process by limiting temperature differences and peak values. For this purpose, numerical analysis is increasingly used, with material parameters determined experimentally. The challenge in modelling arises from the time- and space-dependent thermal properties of concrete, which depend on the progress of cement hydration and changes in microstructure. In study (48), an inverse analysis of the heat conduction problem was applied, using evolutionary algorithms to identify the thermophysical properties of concrete based on temperature measurements obtained from a specially developed testing apparatus (48). In this approach, modelling of cement hydration heat is supported by Bézier curves, and numerical optimization is performed using the finite element method. The proposed method for identifying the thermophysical properties of

odpadów promieniotwórczych (20). W tym przypadku przewidywana temperatura maksymalna nie powinna przekraczać około 70°C z uwagi na zwiększone ryzyko opóźnionego tworzenia ettringitu (50), czego z pewnością należy unikać projektując materiał na osłonę o oczekiwanej wieloletniej trwałości.

7. Samozagęszczalne mieszanki ciężkiego betonu osłonowego

W raporcie IAEA (51) omawiającym zagadnienia starzenia się konstrukcji betonowych w elektrowniach jądrowych znajduje się stwierdzenie, że ponad połowa problemów z degradacją betonu wynika z wad wykonawczych podczas budowy. Wady wykonawcze to m.in. niewłaściwy dobór składników lub receptura mieszanki betonowej, nieodpowiednie zagęszczenie mieszanki, brak lub niepoprawna pielęgnacja, niedostateczny nadzór nad wykonaniem. Przy gęsto ułożonym zbrojeniu w deskowaniu lepszą jakość jego wypełnienie można uzyskać stosując technologię betonu samozagęszczalnego (SCC). Wadą tej technologii jest jednak duże parcie mieszanki na deskowanie, które rośnie wraz z gęstością mieszanki i szybkością jej układania (52). Przewidywanie parcia mieszanki SCC na deskowanie nadal stanowi wyzwanie dla inżynierów, a przyjęcie parcia hydrostatycznego może prowadzić do przewymiarowanych deskowań i spowolnienia robót (53, 54).

Projektowanie betonu ciężkiego samozagęszczalnego stanowi szczególne wyzwanie, ponieważ wymaga znalezienia rozwiązania kompromisowego wobec sprzecznych kryteriów: dużej gęstości kruszywo ograniczających płynność mieszanki i wymaganej łatwości rozplywu mieszanki i jej odporności na segregację. Wcześniejsze publikacje dotyczące ciężkiego SCC były nieliczne, np. (55, 56). Jak wykazano, beton barytowy o gęstości 3300 kg/m³ miał dobrą urabialność bez segregacji, lecz inne mieszanki o dużym rozplywie wykazywały nadmierne wydzielanie wody. Tematyka zapraw samozagęszczalnych z kruszywem ciężkim została podjęta w (57) przy wykorzystaniu barytu i magnetytu oraz cementu portlandzkiego z dodatkiem granulowanego żużla wielkopieczowego, metakaolinu i wapienia. Optymalne proporcje składników mieszanek samozagęszczalnych wyznaczono przy ograniczeniu uziarnienia kruszywo do 2 mm.

Niedawne badania (58) zaowocowały opracowaniem receptur samozagęszczalnych mieszanek betonowych o gęstości do 3570 kg/m³, z kruszywem magnetytowym i serpentynitowym o uziarnieniu do 16 mm, o stabilnej konsystencji i odporności na segregację. Po stwardnieniu betonu nie stwierdzono segregacji mieszanki – gęstość próbek pobranych z różnej wysokości wykonanego słupa była zbliżona. Stwierdzono większą głębokość penetracji wody w kierunku równoległym do betonowania, co wskazuje na pionową orientację porów kapilarnych. Beton z cementu CEM III/A wykazał większą odporność na wnikanie wody prostopadle do kierunku betonowania niż beton z cementu CEM I, co wiąże się z zagęszczeniem warstw przejściowych wokół ziaren kruszywa przy przedłużonym dojrzewaniu. Beton z kruszywem serpentynitowym i cementem portlandzkim CEM I wykazał podwyższoną przepusz-

maturing concrete was applied to heavy-weight concrete mixes containing barite or magnetite aggregate. The innovative use of Bézier curves to describe the heat-source function proved to be an effective inverse-analysis approach across a wide range of heat-release rates during hydration, characteristic of cements with diverse compositions: CEM I, CEM II/B-V, and CEM III/A. By improving the definition of the heat-source function, more accurate representation of thermal processes was achieved, yielding a tool for experimental–numerical temperature prediction in hardening concrete. The model does not yet account for the influence of radiation on accelerating cement hydration, which would be desirable in the context of radioactive-waste cementation technology (20). In such applications, the predicted maximum temperature should not exceed approximately 70 °C due to the increased risk of delayed ettringite formation (50), which should certainly be avoided when designing shielding materials expected to remain durable for centuries.

7. Self-compacting heavy-weight shielding concrete mixes

The IAEA report (51) addressing ageing of concrete structures in nuclear power plants states that more than half of all concrete degradation issues result from construction defects. Such defects include improper selection of mix ingredients or mix design, inadequate compaction, insufficient or incorrect curing, and poor construction supervision. In formwork containing densely arranged reinforcement, better quality of concrete placement can be achieved using self-compacting concrete [SCC] technology. However, a drawback of this technology is the high lateral pressure exerted by the mix on the formwork, which increases with the density of the mix and the rate of placement (52). Predicting the formwork pressure of SCC mixes remains a challenge for engineers, and assuming hydrostatic pressure may lead to oversized formwork and slower construction progress (53, 54).

Designing self-compacting heavy-weight concrete poses a particular challenge, as it requires finding a compromise solution between conflicting criteria: the high density of aggregates, which reduces mix workability, and the required ease of flow and resistance to segregation. Earlier publications on heavy-weight SCC were limited, e.g. (55, 56); as shown, barite concrete with a density of 3300 kg/m³ exhibited good workability without segregation, but other highly flowable mixes showed excessive bleeding. The topic of self-compacting mortars with heavy aggregates was addressed in (57), using barite and magnetite as well as Portland cement with additions of ground-granulated blast-furnace slag, metakaolin, and limestone. Optimal proportions of self-compacting mixtures were determined by limiting aggregate particle size to 2 mm.

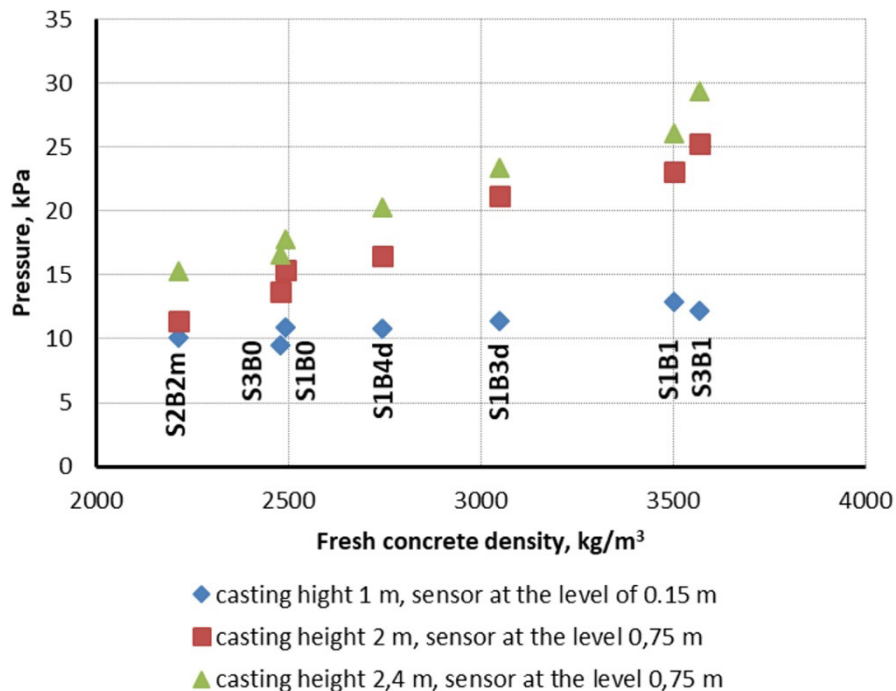
Recent studies (58) resulted in the development of self-compacting concrete mix designs with densities up to 3570 kg/m³, containing magnetite and serpentinite aggregates with particle sizes up to 16 mm, characterized by stable rheology and resistance to segregation. After hardening, no segregation was observed – the density

czalność wody, natomiast przy zamianie cementu na żuźlowy CEM III/A przepuszczalność betonu była niewielka.

Doświadczalnie wykazano (58), że maksymalne parcie boczne jest wprost proporcjonalne do gęstości ciężkich mieszanek betonowych [rys. 9] i nie przekracza 27 kPa, tj. 55% parcia hydrostatycznego. Mieszanki SCC z kruszywem magnetytowym lub z kruszywami magnetytowym i serpentynitowym wykazały docelową klasę konsystencji SF1; rozplływ mieszanek mieścił się w zakresie 550–640 m. Większa lepkość plastyczna mieszanek betonowych jest skorelowana z obniżeniem parcia na deskowanie. Mogło to wynikać z większej adhezji ciężkiej mieszanki betonowej do deskowania i szybszego rozwoju wytrzymałości na ścinanie. Przy szybkości betonowania 1,5 m/h największe parcie występowało ok. 1,5 m poniżej poziomu betonowania, nie przekraczając ok. 55% parcia hydrostatycznego. Mieszanka z kruszywem serpentynitowym wykazała natomiast prawie stałe parcie boczne na całej wysokości ściany, a u podstawy wyższe niż dla pozostałych mieszanek, mimo mniejszej gęstości, co wskazuje na wolniejszy proces twardnienia betonu. Istotnym wnioskiem z badań jest stwierdzenie, że znane zależności określające parcie na deskowanie mieszanek betonowych o normalnej gęstości można z powodzeniem zastosować do ciężkich mieszanek SCC przy uwzględnieniu ich zwiększonej gęstości.

8. Dyskusja i podsumowanie

Na podstawie niedawnych publikacji oryginalnych i prac przeglądowych rysuje się rozszerzony obraz zjawisk występujących w betonie narażonym na oddziaływanie promieniowania jonizującego przy pochłoniętych dawkach promieniowania gamma do 10 MGy. Przedstawiony przegląd literatury wskazuje złożoność oddziaływania promieniowania gamma na materiały o osnowie cementowej. Wiele współzachodzących zjawisk - takich jak radioliza wody, dehydratacja, zmiany mikrostrukturalne oraz przyspieszenie reakcji wskutek podwyższenia temperatury - oddziałuje w sposób trudny do jednoznacznego rozdzielenia. Sytuacja staje się jeszcze bardziej złożona, gdy napromienianie występuje równocześnie z obciążeniem statycznym na beton wywołującym jego pęcznienie. Wpływ promieniowania gamma na pęcznienie betonu jest poznany fragmentarycznie, obserwacje są sprzeczne, nowsze wyniki (59) wskazują na tendencje wzrostu pęcznienia wskutek napromienienia. Ponieważ zjawisko pęcznienia prowadzi do relaksacji naprężeń i zmniejszenia ich koncentracji, jego wpływ na rozwój uszkodzeń radiacyjnych betonu może być w pewnym stopniu korzystny, ale nie w przypadku konstrukcji sprężonych.



Rys. 9. Wpływ gęstości mieszanki betonowej SCC na parcie boczne na deskowanie (58).

Fig. 9. Influence of fresh concrete density of SCC on the lateral pressure on formworks (58).

of samples taken from different heights of the cast column was similar. Greater water penetration depth was found in the direction parallel to casting, indicating vertical orientation of capillary pores. Concrete made with CEM III/A cement showed greater resistance to water ingress perpendicular to the casting direction than concrete made with CEM I, which is associated with densification of interfacial transition zones around aggregate grains during prolonged curing. Concrete with serpentinite aggregate and CEM I cement exhibited increased water permeability, while replacing the cement with slag cement CEM III/A resulted in low permeability.

Experimental results (58) showed that the maximum lateral pressure is directly proportional to the density of heavy-weight concrete mixes [Fig. 9] and does not exceed 27 kPa, i.e., 55 % of hydrostatic pressure. SCC mixes with magnetite aggregate or with combined magnetite and serpentinite aggregates achieved the target consistency class SF1; their flow spread ranged from 550 to 640 mm. Higher plastic viscosity of the concrete mixes correlates with reduced formwork pressure. This may result from greater adhesion of the heavy-weight concrete mix to the formwork and faster development of shear strength. At a casting rate of 1.5 m/h, the highest pressure occurred approximately 1.5 m below the casting level and did not exceed about 55 % of hydrostatic pressure. The mix with serpentinite aggregate, however, showed nearly constant lateral pressure along the entire wall height and higher pressure at the base compared to other mixes, despite its lower density, indicating a slower concrete hardening process. An important conclusion of the study is that known relationships describing formwork pressure of normal-density concrete mixes can be successfully applied to heavy-weight SCC mixes when their increased density is taken into account.

Oddziaływanie promieniowania gamma na twardniejącą zaprawę lub beton nie powoduje istotnych uszkodzeń przy niewielkiej mocy dawki promieniowania, prowadzi nawet do przyspieszenia hydratacji cementu i polepszenia wczesnych właściwości mechanicznych. Punktowo rozpoznano uzależnienie tych efektów od rodzaju kruszywa w betonie i dodatków mineralnych, wyznaczono temperaturowy równoważnik promieniowania. Oddziaływanie promieniowania gamma nie rzutuje negatywnie na przydatność techniki cementacji odpadów promieniotwórczych. Może być nawet narzędziem wczesnej obróbki twardniejących materiałów cementowych, o ile spełnione są warunki kontroli radiologicznej.

Pochłonięta przez beton dawka promieniowania gamma, sięgająca jedynie 2 MGy czyli wielokrotnie mniejsza od tzw. dawki granicznej, może wywołać już zauważalne zmiany mikrostruktury i właściwości ochronnych betonu względem stali zbrojeniowej. Wzmoczona karbonatyzacja przejawia się zwiększeniem zarówno zawartości, jak i rozmiarów kryształów kalcytu, a także poprawą ich właściwości mikromechanicznych w próbkach poddanych napromienieniu. Właściwości mechaniczne zaprawy cementowej nie wydają się ulegać istotnym zmianom; możliwe, że mikropęknięcie spowodowane radiolizą wody jest kompensowane przez nasilone tworzenie się węglanu wapnia pod wpływem promieniowania gamma. Stopień karbonatyzacji oraz utrata stabilności warstwy pasywnej na stali zbrojeniowej zależą od składu mieszanki, w szczególności od zawartości dodatków mineralnych. Istotną rolę odgrywają również warunki środowiskowe, zwłaszcza wilgotność otoczenia.

Składniki betonu potencjalnie adekwatne do wykonania betonu na obiekty inżynierskie w energetyce jądrowej, tj. cement portlandzki, piaski naturalne i kruszywa mineralne ciężkie i normalnej gęstości, zawierają pierwiastki podatne na aktywację w polu promieniowania neutronowego. Obecność głównych, długożyciowych izotopów promieniotwórczych w cemencie CEM I, takich jak ^{152}Eu i ^{60}Co , okazała się proporcjonalna do całkowitej zawartości żelaza Fe i do zawartości alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. Wśród kruszyw grubych najniższe stężenie tych radioizotopów stwierdzono w kruszywie wapiennym, jedynie niewiele większe w kruszywie barytowym.

Z uwagi na kluczową rolę jednorodności betonu wbudowanego w osłony radiologiczne w elektrowni jądrowej opracowano nowe narzędzia do oceny jednorodności w skali mikro i do przewidywania ewentualnego zagrożenia wystąpieniem wczesnych spękań termicznych w obiektach masywnych z betonu ciężkiego. Opracowano również przykładowe receptury składu betonu ciężkiego samozagęszczalnego, opracowano metodykę weryfikacji ich parcia na deskowanie, oryginalnie wykazując jego obniżenie w stosunku do parcia hydrostatycznego. Receptury mogą być przydatne do betonowania tzw. modułowych ścian konstrukcyjnych projektowanych w elektrowni z reaktorem AP1000. Przewiduje się, że nowe narzędzia badawcze będą użyteczne do optymalizacji składu i technologii betonu w nowych obiektach energetyki jądrowej.

8. Discussion and summary

Based on original research articles and review studies, an increasingly comprehensive understanding is emerging of the phenomena and damage mechanisms occurring in concrete subjected to long-term ionizing radiation, even at absorbed gamma doses below 10 MGy. The literature surveyed underscores the multifaceted nature of gamma-radiation interactions with cementitious materials. Numerous concurrent processes—radiolysis, dehydration, microstructural transformations, and the acceleration of chemical reactions due to radiation-induced thermal effects—occur simultaneously in ways that are difficult to unambiguously isolate. The complexity further increases when irradiation occurs simultaneously with a sustained load on the concrete that induces creep. The influence of gamma irradiation on concrete creep is only partially understood, and the available observations are inconsistent; more recent results (59) indicate a tendency toward increased creep as a consequence of irradiation. Since creep leads to stress relaxation and a reduction in stress concentrations, its effect on the development of irradiation-induced damage in concrete may be beneficial to some extent, but not in the case of prestressed concrete structures.

Gamma irradiation of hydrating mortar or concrete does not induce significant deterioration under low dose rates and may, in fact, accelerate hydration and enhance early-age mechanical properties. These effects have been shown to depend on the type of aggregate and mineral admixtures present in the mixture, and an equivalent thermal effect of radiation has been identified. Gamma radiation does not adversely affect the applicability of cementation techniques for the immobilization of radioactive waste; under appropriate radiological control conditions, it may even serve as a tool for the early treatment of hardening cementitious systems.

Absorbed gamma doses as low as 2 MGy – substantially below the so-called threshold dose – may already lead to discernible microstructural modifications and impair the protective performance of concrete cover on steel reinforcement. The enhanced carbonation is manifested by an increase in both the content and the size of calcite crystals, as well as by the improvement of their micromechanical properties in the irradiated specimens. The mechanical properties of the cement mortar do not appear to undergo significant changes; it is possible that microcracking induced by water radiolysis is compensated by the intensified formation of calcium carbonate under gamma irradiation. The degree of carbonation and the loss of stability of the passive layer on reinforcing steel depend on the concrete mix composition, particularly the content of mineral admixtures. Environmental conditions, especially ambient humidity, also play a crucial role.

Concrete constituents commonly employed in nuclear engineering structures – Portland cement, natural sands, and both heavy and normal-density mineral aggregates – contain elements susceptible to activation in neutron fields. The occurrence of major long-lived radionuclides in CEM I cement, such as ^{152}Eu and ^{60}Co , has been found to correlate with total iron content and alkali content ex-

Literatura / References

1. B. Biwer, D. Ma, Y. Xi, Y. Jing, M. Sircar, Review of radiation-induced concrete degradation and potential implications for structures exposed to high long-term radiation levels in nuclear power plants. NUREG/CR-7280, ANL/EVS-20/8, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA (2021).
2. T. Rosseel et al., Review of the current state of knowledge on the effects of radiation on concrete. *J. Adv. Concr. Technol.* **14**, 368–383 (2016).
3. I. Remec, K.G. Field, D.J. Naus, T.M. Rosseel, J.T. Busby, Concrete aging and degradation in NPPs: LWRS program R&D progress report. *Trans. Am. Nucl. Soc.* **109**, 403–406 (2014).
4. I. Maruyama, O. Kontani, M. Takizawa, S. Sawada, S. Ishikawao, J. Yasukouchi, O. Sato, J. Etoh, T. Igari, Development of soundness assessment procedure for concrete members affected by neutron and gamma-ray irradiation. *J. Adv. Concr. Technol.* **15** (9), 440–523 (2017). <https://doi.org/10.3151/jact.15.440>
5. H. Hilsdorf, J. Kropp, H. Koch, The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete. *ACI Spec. Publ.* **55**, 223–254 (1978).
6. O. Kontani, S. Sawada, I. Maruyama, M. Takizawa, O. Sato, Evaluation of irradiation effects on concrete structure – gamma-ray irradiation tests on cement paste. *ASME Power Conf. Proc. POWER2013-98099*, 1–8 (2013).
7. A.M. Brandt, On the influence of ionizing radiation on concrete – state of the art. *Cem. Wapno Beton* **21** (6), 423–438 (2016).
8. K. William, X. Yunping, D. Naus, A review of the effects of radiation on microstructure and properties of concretes used in nuclear power plants. NUREG/CR-7171, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA (2013).
9. A. Łowińska-Kluge, P. Piszora, Effect of gamma irradiation on cement composites observed with XRD and SEM methods in the range of radiation dose 0–1409 MGy. *Acta Phys. Pol. A* **114** (2), 399–411 (2008).
10. A. Łowińska-Kluge, *Kształowanie odporności radiacyjnej kompozytów cementowych*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań (2016).
11. B. Pomaro, G. Xotta, V.A. Salomoni, C.E. Majorana, A thermo-hydro-mechanical numerical model for plain irradiated concrete in nuclear shielding. *Mater. Struct.* **55**, 1–28 (2022). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01844-1>
12. X. Jing, Y. Xi, Theoretical modeling of the effects of neutron irradiation on properties of concrete. *J. Eng. Mech.* **143** (12), 04017137 (2017). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001360](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001360)
13. Y. Le Pape, J. Sanahuja, M.H.F. Alsaïd, Irradiation-induced damage in concrete-forming aggregates: revisiting literature data through micromechanics. *Mater. Struct.* **53**, 62 (2020). <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01489-6>
14. Y. Reches, A multi-scale review of the effects of gamma radiation on concrete. *Results Mater.* **2**, 100039 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2019.100039>
15. L. Szentmiklósi, D. Párkányi, I. Sziklai-László, Upgrade of the Budapest neutron activation analysis laboratory. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **309**, 91–99 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4776-7>
16. L. Szentmiklósi, T. Belgya, Z. Révay, Z. Kis, Upgrade of the prompt gamma activation analysis facilities at the Budapest research reactor. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **286**, 501–505 (2010). <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0765-4>
17. M. Atkins, F.P. Glasser, Application of Portland cement-based materials to radioactive waste immobilization. *Waste Manag.* **12** (2–3), 105–131 (1992). [https://doi.org/10.1016/0956-053X\(92\)90044-J](https://doi.org/10.1016/0956-053X(92)90044-J)

pressed as $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. Among coarse aggregates, limestone exhibits the lowest concentrations of these isotopes, with baryte aggregate showing only marginally higher levels.

Given the critical importance of material homogeneity in concrete used for radiological shielding in nuclear power plants, new analytical tools have been developed to assess micro-scale homogeneity and to predict the risk of early-age thermal cracking in massive heavy-weight concrete structures. Prototype mix designs for self-compacting heavy-weight concrete have also been formulated, together with a methodology for evaluating their formwork pressure, demonstrating—innovatively—that it is reduced relative to hydrostatic pressure. Such mix designs may be useful for concreting the so-called structural modular walls designed for the AP1000 reactor power plant. These research tools are expected to support the optimization of mix design and construction technologies for concrete in next-generation nuclear facilities.

18. J. Li, L. Chen, J. Wang, Solidification of radioactive wastes by cement-based materials. *Prog. Nucl. Energy* **141**, 103957 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103957>
19. B. Kim, J. Lee, J. Kang, W. Um, Development of geopolymer waste form for immobilization of radioactive borate waste. *J. Hazard. Mater.* **419**, 126402 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126402>
20. D. Jacques et al., Towards a scientific-based assessment of long-term durability and performance of cementitious materials for radioactive waste conditioning and disposal. *J. Nucl. Mater.* **557**, 153201 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153201>
21. B. Craeye, G. De Schutter, C. Vuye, I. Gerardy, Cement-waste interactions: hardening self-compacting mortar exposed to gamma radiation. *Prog. Nucl. Energy* **83**, 212–219 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.03.019>
22. Y. Khmurovska, P. Stemberk, S. Sikorin, Y. Kaladkevich, E. Pavalanski, V. Fatseyeu, The effect of gamma-ray irradiation on mechanical properties of early-age cement mortar. *Civ. Eng. J.* **28** (3), 357–363 (2018). <https://doi.org/10.14311/CEJ.2018.03.0028>
23. M.A. Glinicki, M. Dąbrowski, A. Antolik, K. Dziedzic, S. Sikorin, V. Fateev, E. Povolansky, Gamma irradiation sensitivity of early hardening cement mortar. *Cem. Concr. Compos.* **126**, 104327 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104327>
24. M. Dąbrowski, M.A. Glinicki, K. Dziedzic, D. Józwiak-Niedźwiedzka, S. Sikorin, V.S. Fateev, E.I. Povalansky, Early age hardening of concrete with heavy aggregate in gamma radiation source – impact on modulus of elasticity and microstructural features. *J. Adv. Concr. Technol.* **19** (5), 555–570 (2021). <https://doi.org/10.3151/jact.19.555>
25. fib, Model Code 2010 – Final Draft. Fédération Internationale du Béton, Berlin (2010).
26. R. Hoarau Belkhiri, S. Poyet, M. Neji, E. Leoni, S. Esnouf, A. Dauzères, T. Charpentier, Impact de l'irradiation au jeune-âge sur la physico-chimie de la pâte de C3S. *Acad. J. Civ. Eng.* **41** (1), 44–153 (2023). <https://doi.org/10.26168/ajce.41.1.15>
27. C.R. Wilding, D.C. Phillips, C. Lyon, The effects of radiation on intermediate level waste forms. *MRS Proc.* **127**, 513–518 (1988). <https://doi.org/10.1557/PROC-127-513>
28. P. Bouniol, A. Aspart, Disappearance of oxygen in concrete under irradiation: the role of peroxides in radiolysis. *Cem. Concr. Res.* **28**, 1669–1681 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00138-0)
29. F. Vodak, K. Trtik, V. Sopko, O. Kapickova, P. Demo, Effect of γ -irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures. *Cem. Concr. Res.* **35** (7), 1447–1451 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.016>
30. F. Vodák, V. Vydra, K. Trtík, O. Kapičková, Effect of gamma irradiation on properties of hardened cement paste. *Mater. Struct.* **44**, 101–107 (2011). <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9612-x>
31. D. Józwiak-Niedźwiedzka, M. Dąbrowski, K. Dziedzic, D. Jarzabek, A. Antolik, P. Denis, M.A. Glinicki, Effect of gamma irradiation on mechanical properties of mortar and carbonation reaction products. *Mater. Struct.* **55**, 164 (2022). <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02003-w>
32. M. Dąbrowski, M.A. Glinicki, J. Kuziak, D. Józwiak-Niedźwiedzka, K. Dziedzic, Effects of 2 MGy gamma irradiation on steel corrosion in cement-based composites. *Constr. Build. Mater.* **342**, 127967 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127967>
33. M. Dąbrowski, J. Kuziak, K. Dziedzic, M.A. Glinicki, Influence of environmental conditions on steel corrosion in concrete exposed to gamma radiation. *Mater. Proc.* **13**, 44 (2023). <https://doi.org/10.3390/materproc2023013044>
34. M. Migdal et al., MARIA reactor irradiation technology capabilities towards advanced applications. *Energies* **14**, 8153 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14238153>
35. G. Bar-Nes, A. Katz, Y. Peled, Y. Zeiri, The combined effect of radiation and carbonation on immobilization of Sr and Cs ions in cementitious pastes. *Mater. Struct.* **41**, 1563 (2008). <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9348-4>
36. M.F. Montemor, M.P. Cunha, M.G. Ferreira, A.M. Simoes, Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides. *Cem. Concr. Compos.* **24**, 45–53 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00025-7)
37. A. Omori et al., Corrosion monitoring of carbon steel in non-irradiated humidity-controlled environments simulating gamma-ray irradiation. *Mater. Trans.* **63** (4), 555–561 (2022). <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-C2021006>
38. K. Gméling, V. Szilágyi, I. Harsányi, L. Szentmiklósi, Hungarian fine-to-coarse aggregate as constituent of near-vessel structural concrete. *Materials* **16**, 3520 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16093520>
39. A.A. Shanbhag et al., Estimation of natural radioactivity content in rock aggregates. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **326**, 647–656 (2020).
40. D. Józwiak-Niedźwiedzka, K. Gmeling, A. Antolik, K. Dziedzic, M.A. Glinicki, Assessment of long-lived isotopes in alkali-silica resistant concrete. *Materials* **14** (16), 4595 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14164595>
41. Y. Khmurovska, P. Štemberk, T. Fekete, T. Eurajoki, Numerical analysis of VVER-440/213 concrete biological shield under normal operation. *Nucl. Eng. Des.* **350**, 58–66 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.05.004>
42. D. Józwiak-Niedźwiedzka et al., Assessment of long-lived residual radioisotopes in cement induced by neutron radiation. *MATEC Web Conf.* **322**, 01019 (2020). <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032201019>
43. S. Barbhuiya, B. Bhusan Das, P. Norman, T. Qureshi, A comprehensive review of radiation shielding concrete. *Struct. Concr.* **26**, 1809–1855 (2025). <https://doi.org/10.1002/suco.202400519>
44. A. Yahya et al., Investigation of mechanical, microstructure, thermal and gamma-ray attenuation characteristics of serpentinite and ilmenite-based concrete. *Mater. Today Commun.* **47**, 113107 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.113107>
45. J. Dragomirová et al., Optimization of cementitious composite for heavyweight concrete. *J. Therm. Anal. Calorim.* **142**, 255–266 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09530-0>
46. H.T. Kim et al., Reconstruction of concrete microstructure using complementarity of X-ray and neutron tomography. *Cem. Concr. Res.* **148**, 106540 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106540>
47. D.F.T. Razakamandimby, Concrete microstructure characterization using computed tomography image and experiment validation with finite element analysis. PhD thesis, Yonsei University, Seoul (2024).
48. A. Długosz, I. Pokorska, R. Jaskulski, M.A. Glinicki, Evolutionary identification method for determining thermophysical parameters of hardening concrete. *Arch. Civ. Mech. Eng.* **21**, 35 (2021). <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00154-7>
49. G. Knor, R. Jaskulski, M.A. Glinicki, J. Holnicki-Szulc, Numerical identification of thermal properties of early-age concrete. *Heat Mass Transf.* **55** (4), 1215–1227 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2504-2>
50. J. Bensted, J. Munn, Delayed ettringite formation – a concise view. *Cem. Wapno Beton* **14** (5), 240–244 (2009).
51. IAEA, Ageing Management of Concrete Structures in Nuclear Power Plants. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.5, Vienna (2016).

52. J. Golaszewski et al., Rheological properties of SCC in terms of thixotropic behaviour. *Non-traditional Cement & Concrete V*, Brno, 75–78 (2014).
53. P.H. Billberg et al., Field validation of models for predicting lateral form pressure exerted by SCC. *Cem. Concr. Compos.* **54**, 70–79 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.003>
54. Y. Gamil, J. Nilimaa, T. Najeh, A. Cwirzen, Formwork pressure prediction in SCC using deep learning. *Autom. Constr.* **151**, 104869 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104869>
55. D. Revuelta, A. Barona, D. Navarro, Resistance to segregation in heavyweight SCC. *Mater. Construcc.* **59** (295), 31–44 (2009). <https://doi.org/10.3989/mc.2009.43907>
56. H.S. Gökçe, Ö. Andıç-Çakır, Bleeding characteristics of heavyweight concrete mixtures. *Constr. Build. Mater.* **194**, 153–160 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.029>
57. M.T. Palou et al., Formulation and study of heavyweight SCC based on magnetite and barite. *J. Therm. Anal. Calorim.* **149**, 10545–10558 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13418-8>
58. M.A. Glinicki, J. Golaszewski, G. Cygan, Formwork pressure of a heavyweight SCC mix. *Materials* **14** (6), 1549 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14061549>
59. Y. Khmurovska et al., Cement mortar creep under exposure of gamma-ray irradiation. *Proc. NUCLEAR 2019*, Pitesti (2019).