

prof. dr hab. inż. Andrzej M. Brandt¹⁾

Trwałość betonu w obiektach energetyki jądrowej

Durability of concrete in the nuclear energy building object

DOI: 10.15199/33.2015.09.07

Streszczenie. Trwałość poważnych konstrukcji betonowych jest rozpatrywana zawsze z uwzględnieniem wszystkich warunków ich użytkowania, przeważnie z uwagi na wymagania ekonomiczne. W przypadku elektrowni jądrowych trwałość betonu jest ściśle związana z wymaganiami bezpieczeństwa personelu i otoczenia. Beton jest jednym z głównych materiałów w różnych konstrukcjach w elektrowni jądrowej, a także w osłonach w składach materiałów radioaktywnych i w urządzeniach leczniczych. Problem trwałości obejmuje wpływ wszystkich oddziaływań środowiska i powolne procesy wewnętrzne w betonie, a szczególnie wpływ długotrwałego promieniowania na beton w okresie 60 lat i dłużej. W artykule zagadnienie wpływu promieniowania jonizującego na beton jest rozpatrzone na podstawie najnowszych wyników badań i wymagań normowych.

Słowa kluczowe: starzenie betonu, osłona reaktora, trwałość betonu.

Abstract. The durability of important concrete structures is considered always with respect to all requirements of exploitation mostly from the viewpoint of economics. In the case of Nuclear Power Plants (NPPs) the durability of concrete is closely related to the safety of staff and of environment. Concrete is used extensively in main utilities in every NPP, but also in the shields in the storages for nuclear waste and in therapeutic installations. The problem of durability covers the influence of all agents that act on concrete structures from the environment and slow processes in the concrete itself, but the influence of radiation is studied with particular attention. All these actions should be taken into account for the exploitation over 60 years, or perhaps longer. In the paper the problem how the ionizing radiation may influence concrete durability is analyzed on the basis of recent test results and recommendations.

Keywords: aging concrete, reactor shield, durability of concrete.

Trwałość betonu w obiektach energetyki jądrowej, takich jak reaktory, budowle pomocnicze, składy materiałów radioaktywnych i odpadów oraz obiekty badawcze i terapeutyczne [1, 2] należy rozpatrywać w trzech grupach zagadnień, które mogą występować razem lub niezależnie. Są to:

- oddziaływania środowiska zewnętrznego, w postaci wpływu wód opadowych i gruntowych, cykli zamrażania i odmrażania, karbonatyzacji itd.;

- powolne procesy zachodzące w betonie, np. reakcja krzemionki z wodorotlenkami sodu i potasu (ASR) i opóźniony ettringit (DEF);

- wpływ podwyższonej temperatury i promieniowania jonizującego.

Wszystkie oddziaływania wynikające z tych zjawisk trzeba uwzględniać przy rozpatrywaniu możliwości wystąpienia różnych form degradacji betonu, prowadzących do stanów granicznych zarysowania i zniszczenia, a stanowiących konsekwencję stopniowego narastania wewnętrznych naprężeń i postępujących uszkodzeń.

Dwie pierwsze grupy są dobrze rozpoznane w ramach ogólnej wiedzy o konstrukcjach betonowych. Trzecia grupa oddziaływań – łączny wpływ podwyższonej

temperatury i napromieniowania jest przedmiotem intensywnych badań od początku rozwoju energetyki jądrowej w latach 1945 – 1956 i stanowi główny temat artykułu.

W porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi, beton ma dobre właściwości osłonowe przed promieniowaniem, a także dużą trwałość i odporność na podwyższoną temperaturę. Ze względu na stosunkowo niski koszt jest powszechnie używany jako podstawowy materiał do budowy różnego rodzaju osłon, poddanych działaniu promieniowania i podwyższonej temperatury. Dzięki odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej jest stosowany także w konstrukcjach nośnych.

Skutki napromieniowania i podwyższonej temperatury na beton zależą m.in. od intensywności i rodzaju promieniowania oraz wysokości temperatury i czasu trwania tych oddziaływań, a także od ich łącznego działania, np. wpływu podwyższonej temperatury spowodowanej promieniowaniem.

Ocenę wpływu napromieniowania na beton prowadzono w dwóch kierunkach: przez laboratoryjne badania próbek betonu o niewielkich rozmiarach, poddanych wysokim dawkom napromieniowania i podwyższonej temperatury oraz przez analizę stanu próbek, wyciętych z osłon reaktorów, w których można spodziewać się zmian właściwości i struktury betonu. W przeglądzie wiedzy na temat wpływu promieniowania

jonizującego na właściwości betonowych osłon [2] wskazano na konieczność dalszych pogłębionych badań.

Skutki napromieniowania osłon betonowych

Promieniowanie o wysokiej intensywności wymaga odpowiednich osłon, zabezpieczających personel i otoczenie, ale jednocześnie silnie oddziałuje na beton osłon. Skuteczne zatrzymywanie promieniowania pozwala na zmniejszenie grubości ścian osłonowych, ale wówczas wzrasta wpływ promieniowania na strukturę i właściwości betonu. Skutki napromieniowania zależą od składu betonu oraz rodzaju cementu i kruszywa.

Mechanizmy tłumiące w betonie są odmiennie w przypadku promieniowania γ i promieniowania neutronowego. Osłanianie przed promieniowaniem γ jest względnie dokładnie modelowane w postaci trzech różnych procesów, natomiast zatrzymywanie neutronów jest procesem złożonym, przy czym powstaje drugorzędne promieniowanie γ [3].

Badania przeprowadzone po 12 latach działania reaktora w Oak Ridge National Laboratory (ORNL) w USA nie pozwoliły na stwierdzenie zmian we właściwościach betonów w osłonach, przy czym zakładano dawkę neutronów epitermicznych i prędkich na $4 - 8 \cdot 10^{18} \text{ n/cm}^2$ [4]. Badania przeprowadzone w Hanford (USA), przy napromie-

¹⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN; e-mail: abrandt@ippt.pan.pl

niowaniu ocenianym na $2 \cdot 10^{19}$ n/cm² w temperaturze 120 °C, również wykazały brak istotnych zmian wytrzymałości betonów.

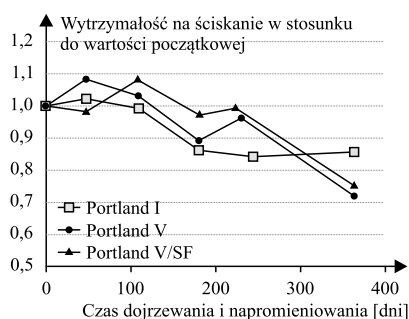
Wartości krytyczne napromieniowania

Wyniki badań podawane w publikacjach wskazują na różne wartości krytyczne napromieniowania, a w starszych źródłach brakuje niektórych informacji, m.in. o składzie betonu i warunkach przeprowadzenia pomiarów. Wieloletnie promieniowanie z reaktora symulowano przez promieniowanie o większym natężeniu neutronów z innych urządzeń, ale o krótszym działaniu. Spodziewane są wyniki badania próbek betonu z rozbieranych reaktorów.

Podwyższona temperatura betonu może być przyczyną dodatkowych naprężeń ze względu na różnicę współczynnika odkształcalności termicznej matrycy cementowej i ciężkiego kruszywa. Callan [5] zalecił, aby ta różnica nie przekraczała $0,5 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Warto zauważyć, że współczynniki odkształcalności termicznej mają różne wartości, np. granit $0,85 \cdot 10^{-5}$; stal $1,2 \cdot 10^{-5}$; beton (kruszywo wapienne) $0,6 - 0,9 \cdot 10^{-5}$; beton (kruszywo bazaltowe) $0,8 - 0,95 \cdot 10^{-5}$; beton (kruszywo z piaskowca) $0,9 - 1,2 \cdot 10^{-5}$.

Soo i Millian [6] badali wpływ napromieniowania γ na wytrzymałość konwencjonalnych zapraw cementowych. Próbkę wykonano z różnego rodzaju cementów portlandzkich i piasku, stosując także pył krzemionkowy. Uzyskane wyniki wskazują, że spadek wytrzymałości następuje znacznie poniżej wartości napromieniowania 10^8 Gy, uważanej powszechnie za graniczną. Jako przyczynę podano zmniejszenie ilości wody hydratacyjnej, ale stwierdzono, że przy niewielkim natężeniu radiacji rzędu 31 Gy/h spadek wytrzymałości był rejestrowany już przy dawce 10^5 Gy i po 400 dniach osiągnął ok. 20% (rysunek). Badania te prowadzono przede wszystkim z uwagi na trwałość osłon w składowiskach odpadów radioaktywnych. Stwierdzono, że przy określonej dawce promieniowania mniejsza intensywność powoduje większą degradację wytrzymałości, np. przy 31 Gy/h straty wytrzymałości nastąpiły już przy dawce ok. 10^5 Gy. Przyczyny spadku wytrzymałości po napromieniowaniu nie zostały określone (mogą być związane z utratą wody związanej w cementie i wody w porach).

W raporcie przygotowanym w USA przez zespół William i in. [7] zestawiono wartości krytyczne napromieniowania wg



Spadek wytrzymałości na ściskanie matrycy cementowej wraz z czasem dojrzewania i napromieniowania [6]

Decrease of compressive strength of cement based matrix with ageing and radiation time [6]

różnych przepisów. Wynikają z niego następujące krytyczne wartości napromieniowania: neutronów prędkich – 10^{20} n/cm², a promieniowania γ – $2 \cdot 10^8$ Gy.

Fillmore [4] i Mirhosseini [8] twierdzą, że pierwotne osłony wytrzymują dawki $5 \cdot 10^{19}$ n/cm². Betonowe obudowy reaktorów mogą być wystawione na działanie termicznych i prędkich neutronów oraz promieniowania γ o wartościach odpowiednio ok. $6 \cdot 10^{19}$ n/cm², $2 - 3 \cdot 10^{18}$ n/cm² oraz 10^9 Gy w ciągu 30 lat. Wcześniejsze wyniki badań w UK wskazywały na stały strumień ok. $3 \cdot 10^{11}$ n/cm² s, co odpowiada fluencji $3,78 \cdot 10^{20}$ n/cm² po 40 latach [9].

W latach 1960 – 1980 przyjęte wartości krytyczne były różne wg różnych krajowych zaleceń:

- wg Jaegera [10] uszkodzenie spowodowane nagraniem jest ważniejsze niż przez napromieniowanie. Zalecono jednak, aby strumień (gęstość) neutronów był ograniczony do $5 \cdot 10^{19}$ n/cm² s, a promieniowanie γ o mocy 1 MeV powinno być ograniczone do $4 \cdot 10^{10}$ n/cm s;

- wg ASME graniczna wartość to 10^{20} n/cm²;

- w UK określono, że w przypadku konstrukcji sprężonych skutki działania promieniowania neutronowego o wartości poniżej $5 \cdot 10^{19}$ n/cm² można uważać za nieznaczne;

- wg ANSI/ANS (2006) wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie oraz moduł sprężystości mogą ulegać degradacji przy dawce powyżej 10^{19} n/cm², a promieniowania γ powyżej 10^8 Gy;

- w zaleceniach ACI 349.3R-2002 [11] zaproponowano jako bezpieczne, ze względu na możliwą degradację betonu po długotrwałej ekspozycji, dawki powyżej 10^{21} n/cm² oraz 10^8 Gy.

Podane wartości dotyczą elementów najbardziej narażonych na promieniowa-

nie. W pozostałych fragmentach konstrukcji przyjęto znacznie mniejsze dawki.

Konno [12] przedstawił ilościowe dane o napromieniowanym betonie po rozebraniu reaktora doświadczalnego o mocy 45 MW w Japonii po 25 latach, w tym 957 dniach, tzn. 14230 h funkcjonowania reaktora. Na poziomie reaktora, beton w biologicznej osłonie otrzymał dawkę $1,11 \cdot 10^{18}$ n/cm² neutronów oraz promieniowania $\gamma = 4,77 \cdot 10^{18}$ Gy. Te dawki odpowiadają w przybliżeniu betonowej osłonie reaktora energetycznego po 40 latach eksploatacji. Przeprowadzone badania wykazały, że wytrzymałość na ściskanie nie była zmniejszona, a nawet wzrosła aż do 10^{17} n/cm², a trwałość osłony betonowej okrytej płaszczem stalowym nie uległa zmniejszeniu pomimo nagrzewania od strumienia neutronów i promieniowania γ . Osłonę wykonano z betonu zwykłego o wytrzymałości na ściskanie 35 MPa. Była ona chłodzona przez system rur ułożonych od strony reaktora. Obliczone wartości promieniowania korygowano doświadczalnie przy użyciu izotopu Eu-152.

Ichikawa i Kimura [13] stwierdzili, że promieniowanie γ nie powoduje degradacji betonu aż do dawki 10^{10} Gy. Natomiast napromieniowanie prędkimi neutronami powyżej fluencji $5 \cdot 10^{19}$ n/cm² powoduje uszkodzenie betonu z powodu rozszerzania kruszywa i skurczu matrycy cementowej. Poziomy odniesienia wyznaczano, zakładając sumowanie się różnych przyczyn degradacji. W Electric Power Research Institute (EPRI) określono w 2012 r. próg promieniowania γ na 10^8 Gy. Maruyama i in. [14] opisali przygotowania do badania wpływu napromieniowania na beton i krytycznie ocenili dotychczasowe wiadomości na ten temat. Jako wartości progowe napromieniowania betonu przyjęto w Japonii 10^{20} n/cm² w przypadku szybkich neutronów oraz $2 \cdot 10^8$ Gy w przypadku promieniowania γ . Oznacza to, że konstrukcje betonowe są uznane za bezpieczne, dopóki te wartości nie są przekroczone, nawet po okresie eksploatacji ponad 30 lat. Przeprowadzone badania wstępne wykazały pęcznienie ziaren kruszywa krzemianowego pod wpływem obu rodzajów promieniowania, przy czym zwiększa się ono wraz z gęstością kruszywa. Ponadto stwierdzono skurcz zaprawy cementowej, związany z wysychaniem, i powstawanie układów rys wokół ziaren kruszywa. Skutkiem tych zmian był spadek sztywności i wytrzymałości betonu badanych próbek.

Lo Monte i Gambarova [15] badali beton z barytowym kruszywem w tempera-

turze 500 i 750 °C. W porównaniu ze zwykłym betonem konstrukcyjnym stwierdzono wyższą wytrzymałość na ściskanie po cyklicznym ogrzewaniu do 500 °C i chłodzeniu oraz zbliżoną wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i trochę niższy moduł sprężystości. Trwałość w podwyższonej temperaturze jest zbliżona do zwykłego betonu dobrej jakości z kruszywem krzemionkowym lub wapiennym, ponieważ współczynnik odkształcalności termicznej kruszywa barytowego i zaprawy cementowej są podobne. W efekcie nie występują istotne naprężenia w warstwie stykowej podczas cyklicznych zmian temperatury w osłonie z betonu barytowego. Jednym z objawów napromieniowania jest zmiana porowatości w warstwie przyściennej (po ogrzaniu następował niewielki wzrost średnicy porów betonu barytowego). Kruszywo barytowe nie ułatwia przygotowania betonu dobrej jakości [16].

Z przedstawionych badań wynika, że wartości krytyczne napromieniowania betonu zostały w przybliżeniu określone i zależą od składu betonu, a przede wszystkim od kruszywa. Rodzaj neutronów i energia promieniowania γ również wpływają na te wartości. W niektórych przypadkach nie stwierdzono degradacji betonu w osłonach, być może z powodu niższych dawek niż wartości krytyczne. Wielu autorów zwraca uwagę na zróżnicowanie wyników publikowanych w różnych źródłach, przypisując to niejednakowym warunkom prowadzenia badań i stosunkowo małej liczbie badanych próbek. Niezbędne są dalsze badania, ponieważ starzenie się elektrowni atomowych wskazuje na konieczność określenia granic ich użytkowania.

Trwałość osłon betonowych

Wymagania dotyczące osłon betonowych w elektrowniach jądrowych obejmują łącznie zachowanie trwałości wobec wszystkich oddziaływań w stanach użytkowania oraz spełnienie warunków osłonności, stosownie do rodzaju i natężenia promieniowania w okresie normalnej eksploatacji. Bezpieczeństwo w stanach awaryjnych musi być także brane pod uwagę.

W zapewnieniu trwałości szczególne znaczenie ma ograniczenie możliwości powstawania ASR i DEF, których rozwój jest trudny lub niemożliwy do zatrzymania. Warunki zachodzenia tych reakcji w zwykłych konstrukcjach żelbetowych są dosyć dobrze rozpoznane. Natomiast przy od-

działywaniu promieniowania jonizującego i podwyższonej temperatury powstają w osłonach warunki sprzyjające ich wystąpieniu nawet w przypadku kruszyw o niewielkiej podatności na te zjawiska. W obecnym stanie wiedzy konieczne są dalsze badania, aby przez odpowiednią selekcję kruszyw i dobór cementów całkowicie wyeliminować zagrożenie.

Promieniowanie γ i neutronowe jest zatrzymywane lub odpowiednio tłumione przez osłony o wysokiej gęstości oraz zawierające dostateczną ilość wody. Stal i beton spełniają te wymagania w różnym stopniu i zakresie. W przybliżeniu można przyjąć, że przy jednakowej grubości osłony, promieniowanie pierwotne i wtórne γ jest zatrzymywane proporcjonalnie do gęstości. Przegroda betonowa powinna więc zawierać ciężkie kruszywa, aby spowalniać prędkie neutrony, a także wodór w celu spowalniania pośrednich neutronów i zatrzymywania powolnych. Głównym źródłem wodoru w betonie jest woda krystalizacyjna, ponieważ woda swobodna znika w procesie dyfuzji podczas dojrzewania betonu tym szybciej, im wyższa jest temperatura. Ilość wody związanej w matrycy cementowej musi być uzupełniona przez wodę związaną w kruszywie i składniki zawierające minerały o małej liczbie atomowej, np. bor. Ponadto należy unikać nawet śladowych ilości takich pierwiastków, które mogłyby wywołać szkodliwe zjawiska, np. wtórnego promieniowania γ .

Wymagania dotyczące ograniczenia rozmiarów osłon i minimalizacji kosztów mają znaczenie drugorzędne, ale także muszą być rozpatrywane przy projektowaniu konstrukcji osłonowych w elektrowniach jądrowych, składowiskach odpadów i instalacjach terapeutycznych.

Niezawodność osłon betonowych pozostaje podstawowym wymaganiem dotyczącym urządzeń, w których występuje promieniowanie jonizujące, połączone z oddziaływaniem podwyższonej i zmiennej temperatury. Dalsze badania są niezbędne, aby określić warunki trwałości betonu w konstrukcjach reaktorów kolejnych generacji, a także w laboratoriach terapeutycznych i składowiskach odpadów. Warunkiem bezpiecznego użytkowania są także systemy kontroli, szczegółowo opracowywane i opisywane w materiałach publikowanych m.in. przez IAEA i US Nuclear Regulatory Commission.

Artykuł oparty jest na referacie przedstawionym podczas XXVII Konferencji Naukowo-Technicznej „Awarie Budowlane 2015”.

Literatura

- [1] Brandt A. M. (2013). Beton jako materiał osłon w budownictwie związanym z energetyką jądrową. *Cement Wapno Beton*, Polski Cement, 2, 115 – 132.
- [2] Brandt A. M., Józwiak-Niedźwiedzka D. (2013). O wpływie promieniowania jonizującego na mikrostrukturę i właściwości osłon betonowych, przegląd. *Cement, Wapno, Beton*, 4, 2013, 216 – 237.
- [3] Kaplan M. F. (1989). *Concrete radiation shielding*. Longman Scientific and Technical, 457 s.
- [4] Fillmore D. L. (2004). Literature review of the effects of radiation and temperature on the aging of concrete. *Idaho Nat. Eng. and Env. Lab., Idaho Falls*, 26 s.
- [5] Callan E. J. (1952). Thermal expansion of aggregates and concrete durability. *J. Amer. Concr. Inst. Proceedings*, Feb. 48, page 485; discussion Dec., 504 – 511.
- [6] Soo P., Millian L. M. (2001). The effect of gamma radiation on the strength of Portland cement mortars. *J. of Mat. Sci., Letters* 20, 1345 – 1348.
- [7] William K., Yunping Xi, Naus D., Graves H. L. III (2013). A review of the effects of radiation on microstructure and properties of concretes used in nuclear power plants. *US Nuclear Regulatory Commission (NUREG)*. Washington, DC.
- [8] Mirhosseini S. S. (2010). The effects of nuclear radiation on Aging reinforced concrete structures in nuclear power plants, MA Thesis, Waterloo University, 154 s.
- [9] Alexander S. C. (1963). Effects of irradiation on concrete. Final results. *Atomic Energy Research Establishment, Harwell*, 34 s.
- [10] Jaeger R. G. ed. (1975). *Engineering Compendium on Radiation Shielding*. Springer-Verlag, 436 s.
- [11] ACI 349.3R-02 (2002). Evaluation of existing nuclear safety-related concrete structures, 18 s.
- [12] Konno T. (2002). Concrete properties influenced by radiation dose during reactor operation. *Nucl. Energy Agency, Comm. for the Safety of Nucl. Install.*, 7, vol. 2.
- [13] Ichikawa T., Kimura T. (2007). Effect of nuclear radiation on alkali-silica reaction of concrete. *J. of Nuclear Science and Technology*, 44, 10, 1281 – 1284.
- [14] Maruyama I., Kontani O., Sawada S., Sato O., Igarashi G., Takizawa M. (2013). Evaluation of irradiation effects on concrete structure – background and preparation of neutron irradiation test. *Proc. of the ASME 2013 Power Conf., Boston, Mass.*, 9 s.
- [15] Lo Monte F., Gambarova P. G. (2014). Thermo-mechanical behavior of baritic concrete exposed to high temperature. *Cem.&Concr. Comp.*, 53, 305 – 315.
- [16] González-Ortega M. A., Cavalero S. H. P., Aguado A. (2015) Influence of barite aggregate friability on mixing process and mechanical properties of concrete. *Constr. ofBuil. Mat.*, 74, 169 – 175.

Przyjęto do druku: 12.08.2015 r.