



## TRWAŁOŚĆ BETONU W KONSTRUKCJACH ZWIĄZANYCH Z ENERGETYKĄ ATOMOWĄ

ANDRZEJ M. BRANDT

**Streszczenie:** Trwałość poważnych konstrukcji betonowych jest rozpatrywana zawsze uwzględniając wszystkie warunki 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 rozmaitych 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 studiowany jest wpływ długotrwałego promieniowania na beton w okresie 60. lat i nawet dłużej. W referacie zagadnienie wpływu jonizującego promieniowania na beton jest rozpatrzone na podstawie najnowszych wyników badań i wymagań normowych.

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

### 1. Wprowadzenie

Trwałość budowli jest tematem podejmowanym od kilkadziesiąt lat w wielu krajach z różnych powodów. Przede wszystkim, częściej niż dawniej, trwałość okazuje się niedostateczna, to znaczy nie odpowiada oczekiwaniom użytkowników obiektów i przewidywaniom projektantów. Ograniczając rozważania do konstrukcji betonowych, można zaobserwować zarówno wpływ bardziej agresywnego środowiska niż to było przed kilkadziesiąt laty, jak i być może skutek zmieniającego się składu betonów, m.in. zwiększonego rozdrobnienia stosowanych cementów i roli niektórych dodatków i domieszek, które nie zawsze korzystnie wpływają na trwałość, Brandt (2008).

Trwałość większości konstrukcji inżynierskich, drogowych i przemysłowych, ma znaczenie przede wszystkim ekonomiczne, ponieważ uszkodzenia powodują kosztowne naprawy oraz utrudnienia czy wyłączenia z użytkowania. W przypadku obiektów energetyki jądrowej argumenty ekonomiczne są także istotne, ale dochodzi jeszcze niezmiernie ważny aspekt bezpieczeństwa: ochrony pracowników i otoczenia. Jest więc oczywiste, że wymaganie trwałości powinno być tu szczególnie starannie określone i przestrzegane. Obiekty techniki jądrowej to zarówno reaktory wraz ze wszystkimi budowlami pomocniczymi, jak i składy materiałów radioaktywnych i odpadów, a także urządzenia badawcze i terapeutyczne, w których takie materiały promieniotwórcze są używane lub przechowywane. We wszystkich tych obiektach trwałość betonu jako materiału konstrukcji nośnych i osłon ma podstawowe znaczenie, Brandt (2013), Brandt, Józwiak-Niedźwiedzka (2013).

Obiekty energetyczne i urządzenia terapeutyczne mają ustalone okresy eksploatacji, natomiast składowiska odpadów radioaktywnych muszą być dostosowane do użytkowania w długich okresach czasu. We wszystkich tych obiektach konieczne jest zapewnienie bezpieczeństwa.

Trwałość betonu w konstrukcjach i osłonach można rozpatrywać w trzech grupach zagadnień, które mogą być wzajemnie uzależnione albo występują 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 rozmaitych 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, jednak badania ASR i opóźnionego ettringitu nadal są rozwijane w wielu laboratoriach w związku z budową elektrowni atomowych, ponieważ wymagana tu jest trwałość i wyjątkowa niezawodność konstrukcji nośnych i osłon. Występowanie reakcji alkalicznej kruszywa jest szczególnie częste wobec podwyższonej temperatury betonu i zwiększonej wilgotności otoczenia reaktorów jądrowych, a w wielu przypadkach pojawia się także przy wykorzystaniu kruszyw, uznanych za niereaktywne, Saouma, Hariri-Ardebili (2014). Również zjawisko opóźnionego ettringitu skupia uwagę w związku z budową elektrowni jądrowych ze względu na okoliczności sprzyjające, które powstają w masywnych konstrukcjach betonowych poddanych wspomnianym wyżej warunkom termicznym i wilgotnościowym, Recommendations for Preventing Disorders due to DEF (2009).

Ze względu na podwyższoną możliwość występowania ASR i DEF w obiektach budowlanych w elektrowniach jądrowych, szczególne wymagania obejmują przede wszystkim odpowiednią kompozycję betonu, ale także szczególną jakość wykonania robót budowlanych.

Trzecia wymieniona grupa oddziaływań – łączny wpływ podwyższonej temperatury i napromieniowania jest przedmiotem intensywnych badań od początków rozwoju energetyki jądrowej w latach od 1945 do 1956 i stanowi główny temat niniejszego opracowania.

W porównaniu do innych materiałów konstrukcyjnych, beton ma dobre właściwości osłonowe przed promieniowaniem jądrowym, a także wysoką 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 promieniowania i podwyższonej temperatury na beton zależą od wielu czynników, jak intensywność i rodzaj promieniowania oraz wysokość temperatury i czas trwania tych oddziaływań, a także od ich łącznego działania, np. wpływ podwyższonej temperatury, spowodowanej promieniowaniem.

Degradację betonu stwierdzoną w szeregu obiektów można nazwać oznakami starzenia, wynikającego z sumowania wpływu napromieniowania i dwóch pozostałych grup zjawisk podczas wieloletniej eksploatacji. Analiza zmian konstrukcji i osłon betonowych i dokładne poznanie tych procesów starzenia są konieczne, aby ograniczyć lub uniknąć znacznych kosztów i utrudnień w użytkowaniu w obecnie działających i planowanych obiektach energetyki jądrowej.

Ocenę wpływu napromieniowania na beton prowadzono w dwóch kierunkach: przez laboratoryjne badania próbek betonu o niewielkich rozmiarach, poddanych wysokim dawkom napromieniowania i podwyższonej temperaturze 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 własności betonowych osłon, Brandt, Józwiak-Niedźwiedzka (2013) wskazano na konieczność dalszych pogłębionych badań, których kierunki są przedstawione poniżej na tle najnowszych znanych wyników badań i obserwacji betonu w obiektach energetyki jądrowej. Takie badania są prowadzone w wielu laboratoriach na świecie, a także w ramach organizacji krajowych i międzynarodowych, np. American Concrete Institute, International Atomic Energy Association i U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Sytuacje spowodowane działaniami terrorystycznymi, zjawiskami tektonicznymi i awariami w reaktorach jądrowych muszą być kontrolowane niezależnie i nie są rozpatrywane w rozważaniach, dotyczących trwałości.

## 2. Beton w konstrukcjach osłonowych

### 2.1. Oddziaływania na beton

Pierwsze elektrownie jądrowe produkujące energię w skali przemysłowej powstałe w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia: 1956 – Calder Hall (UK), 1958 – Shippingport (USA) i następne, także w Kanadzie, we Francji i w Japonii, były planowane na 40-letnią eksploatację. Po zbliżeniu się do końca tego okresu, przedłużano licencje na kolejne lata na podstawie odpowiednich sprawdzeń. Wymagało to rozpoznania przyczyn znalezionych uszkodzeń oraz ich zakresu i wpływu na nośność konstrukcji i na osłonność przed promieniowaniem, połączonych z naturalnymi czynnikami starzenia betonu; badania takie prowadzono już w latach 50. i 70., aby określić mechanizmy i zakres możliwych degradacji betonu.

Naturalne procesy korozyjne rozwijać się mogą w otoczeniu o wysokiej wilgotności i wobec czynników agresywnych w stosunku do składników betonu. Równocześnie występują dwa oddziaływania, które trudno rozdzielić: promieniowanie jonizujące i podwyższona temperatura, Naus (1999). Rozdzielenie takie jest przydatne do modelowania i przewidywania rozwoju tych zjawisk, przy czym trzeba oddzielnie rozpatrywać zachowanie się kruszywa i matrycy, a szczególnie – warstwy przejściowej wokół ziaren matrycy. Powstające i rozwijające się mikrorysy ułatwiają dalszą degradację betonu, stwierdzoną na przykład w elektrowni Seabrook w USA, Next Era Energy, (May 15, 2014). NRC Inspection Report (2015).

Różne rodzaje promieniowania powstają w elektrowniach jądrowych i w składowiskach materiałów i odpadów promieniotwórczych. Ze względu na łatwość zatrzymywania lub niewielką energię pomijany jest wpływ na beton promieniowania  $\alpha$ ,  $\beta$  i X (promienie Roentgena), natomiast prace badawcze są prowadzone głównie nad zagadnieniami starzenia betonu i redukcji osłonności pod wpływem promieniowania neutronowego i  $\gamma$ .

Promieniowanie  $\gamma$  jest to promieniowanie elektromagnetyczne elektrycznie obojętne, o wysokiej częstotliwości i wysokiej energii, powodujące wzrost temperatury. Promienie  $\gamma$  mają energię powyżej 100 keV i długość fali poniżej 10 pm (pikometrów). Wpływ takiego promieniowania na materiały stałe o wiązaniach jonowych i metalicznych jest pomijalny, ale może powodować destrukcję w materiałach o wiązaniach kowalencyjnych. Woda w betonie może być rozłożona przez promieniowanie  $\gamma$  w procesie radiolizy i powstaje wodór, tlen i woda utleniona, Kontani i in. (2010). Woda jest także usuwana z betonu przez parowanie wobec powstałego ciepła. Ponieważ większa część wody w betonie jest zawarta w zaczynie cementowym, to promieniowanie  $\gamma$  wpływa silniej na zaczyn, niż na ziarna kruszywa.

Promienie  $\gamma$  są spowalniane przez zderzenia z elektronami i beton w osłonach powinien mieć wysoką gęstość elektronów, uzyskaną przez zastosowanie odpowiednich cementów, przez dobre zagęszczenie betonu i przez użycie ciężkiego kruszywa. Najbardziej efektywne są specjalne kruszywa, np. uzyskane z rud żelaza, Callan (1952, 1953), baryty i in.

Neutrony są elektrycznie obojętne, a mikrostruktura materiału ulega zmianom na skutek zderzeń neutronów z jądrami atomów. Neutrony mają większy wpływ na materiały krystaliczne o dużej gęstości, jak ziarna kruszywa, niż na przypadkowo rozmieszczone atomy w zaczynie cementowym o wysokiej porowatości. Ilość promieniowania neutronowego – fluencja – jest określana przez liczbę neutronów przechodzących przez jednostkę powierzchni i jest wyrażana przez  $n/cm^2$ . Oddziaływanie promieniowania jądrowego na strukturę betonu może spowodować zmiany, polegające na przemieszczeniu atomów w składnikach betonu, oraz zmianę struktury krystalicznej na bezpostaciową, powodując wzrost porowatości i powstawanie mikrorys.

Te modyfikacje mikrostruktury pod wpływem promieniowania decydują o zmianach właściwości betonu: redukcję ciężaru właściwego i wzrost objętości, wewnętrzną karbonizację betonu oraz znaczny wzrost reaktywności alkalicznej (ASR) nawet takich kruszyw, które zasadniczo nie wykazuje tendencji do takiej reakcji

Niewiele jest danych doświadczalnych na temat wpływu napromieniowania na właściwości mechaniczne i fizyczne betonu, przy czym wpływ ten jest oceniany rozmaicie, Fujiwara i in. (2009).

## 2.2. Wpływ podwyższonej temperatury

Badania wpływu długotrwałej podwyższonej temperatury na beton, spowodowanej promieniowaniem  $\gamma$ , wskazują na dwa różne występujące efekty: zmiany składników betonu i uszkodzenia mechaniczne w postaci pęknięcia i powstawania rys. Mogą one powodować pogorszenie właściwości mechanicznych (wytrzymałości i odkształcalności) betonu wraz z wysokością temperatury i długością okresu oddziaływania. Również szybkość narastania i spadku temperatury wpływają na powstawanie uszkodzeń.

Skutki długotrwałego działania podwyższonej temperatury to przede wszystkim ubytek wilgoci z betonu, szczególnie w warstwie zbliżonej do ogrzewanej powierzchni, a ubytek wody powoduje zmiany fizyczne w zaczynie cementowym. Według raportu Fillmore (2004) wzrost temperatury od 20°C i długotrwała temperatura dochodząca do ok. 95–100°C może spowodować wyraźny spadek wytrzymałości na ściskanie, a na rozciąganie nawet o 50%, ponad to także spadek modułu sprężystości oraz wartości pełzania, skurczu i przewodności termicznej. Te objawy degradacji betonu występują niezależnie od działania promieniowania, a gwałtowne zmiany temperatury oraz zmiany cykliczne prowadzą do pojawiania się uszkodzeń.

Okazało się jednak niemożliwe lub trudne odróżnienie przyczyn tych zmian: wzrost temperatury czy napromieniowanie.

## 2.3. Wpływ promieniowania

Podstawowe pytania odnoszące się do wpływu promieniowania na beton sformułowali Hilsdorf i in. (1978) w następującej formie:

- czy promieniowanie jądrowe wpływa na właściwości mechaniczne betonu, a zwłaszcza na wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie, moduł sprężystości, współczynniki rozszerzalności termicznej i przewodnictwa cieplnego, właściwości osłonne?
- jaka jest krytyczna dawka promieniowania, powyżej której można spodziewać się poważnych zmian właściwości betonu?
- czy ta krytyczna dawka promieniowania jest poniżej lub powyżej spodziewanych wartości w konstrukcjach w istniejących lub projektowanych w elektrowniach atomowych w okresie ich eksploatacji?

Dwie przyczyny uszkodzeń betonu poddanego promieniowaniu to zmiana właściwości mechanicznych, takich jak uszkodzenie więzów w materiale i wzrost kruchości, a także lokalny wzrost temperatury, spowodowany absorpcją energii promieniowania. Promieniowanie może także wpływać na rozkład i rozmiary porów, powstawanie rys oraz uszkadzać strukturę betonu przez rozkład wody. Skutkiem może być pogorszenie właściwości osłonowych, zmniejszenie wytrzymałości, a w konsekwencji ograniczenie trwałości.

Szczegółowo rozpatrzeć trzeba zjawiska dotyczące kruszyw, stosowanych w betonach osłonowych, warstw przejściowych między kruszywem a matrycą cementową i samych matryc. Kruszywa specjalne, chociaż mają większą gęstość niż powszechnie stosowane, to jednak pod wpływem promieniowania mogą ulegać korozji, powodującej pęcznienie i pęknięcie

ziaren. Reakcja kruszywa z roztworem w porach betonu (ASR), zawierającym jony sodu i potasu, powoduje powstanie żelu uwodnionego krzemianu sodowo-potasowo-wapniowego. Żel jest ekspansywny, co prowadzi do powstawania wewnętrznych naprężeń i mikrorys, powodujących nieuniknione pogorszenie wytrzymałości i szczelności. Zmiany w warstwach przejściowych i w matrycy cementowej mogą obejmować wzrost porowatości. Wymienione zmiany prowadzą także do zmniejszenia trwałości betonu.

Na podstawie badań doświadczalnych opublikowanych w okresie poprzedzającym publikację Hilsdorfa i in. (1978) przyjęto odpowiednio wartości krytyczne w przypadku prędkich neutronów  $1 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> oraz  $2 \times 10^8$  Gy dla promieniowania  $\gamma$ . Stwierdzono zależność tych wartości od rodzaju neutronów (powolne i prędkie) oraz składu betonu (rodzaje cementu i kruszywa). Już w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia stwierdzono, że gęstość krzemianów i kwarców w kruszywie ulega zmniejszeniu pod działaniem prędkich neutronów; np. objętość kwarcu zmniejsza się o 6,6%. Wzrost pękania betonu wraz ze spadkiem wytrzymałości uznano za możliwy. Wartości krytyczne napromieniowania, określono na  $1 \cdot 10^{19}$ – $1 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>, przy czym może to być zależne od rodzaju neutronów. Przez wartość krytyczną można rozumieć ilość promieniowania, która wywołuje dostrzegalne zmiany w strukturze i właściwościach betonu. Występujący wzrost temperatury spowodowany napromieniowaniem oceniono jako mniej znaczący. Napromieniowanie krytyczne może powodować także wyraźny wzrost objętości betonu, wpływając na mikrostrukturalne zmiany w kruszywie i budowie krystalicznej; te zmiany mogą wywoływać uszkodzenia w betonie. Uznano, że ważnym objawem degradacji betonu jest powstawanie rys, które poza mechanicznym osłabieniem i ułatwieniem agresji chemicznej w betonie powodują zmniejszenie osłonności.

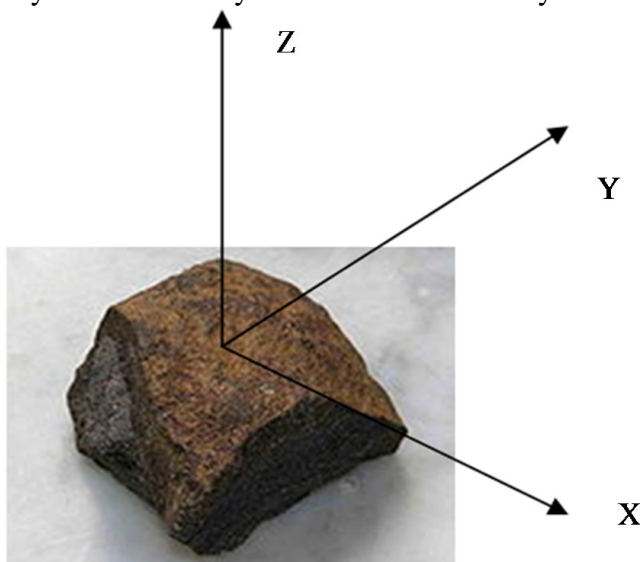
W późniejszych publikacjach wskazano, że warunki przeprowadzenia badań publikowanych przez Hilsdorfa znacznie różniły się od tych, w których znajdują się elementy betonowe w reaktorach rozmaitych typów i odmian, budowanych w wielu krajach w następnych latach. Wnioski Hilsdorfa były krytykowane, m.in. przez Maruyama i in. (2013), Fujiwara i in. (2009). Stwierdzono niezgodności w mierzonych właściwościach, określeniu rodzajów spoiwa w betonach oraz wielkości próbek i temperatury betonu, chociaż sformułowanie zagadnień trwałości i próby ich rozwiązywania proponowane w 1978 r. stanowią nadal istotny poziom odniesienia dla współczesnej wiedzy. Szczegółowe analizy odnoszące się do ówczesnych rezultatów prowadzą m.in. do wniosków, że w przypadku osłon reaktorów typu PWR temperatura nie przekraczała 65°C, a zasadnicze znaczenie ma wytrzymałość betonu na ściskanie, podczas gdy niektóre doświadczenia wykonywano na próbkach rozciąganych. Mimo tej krytyki publikacja Hilsdorfa (1978) jest nadal źródłem cytowanym, a bardziej szczegółowa analiza rezultatów tych badań została niedawno opublikowana, Brandt i Józwiak-Niedźwiedzka (2013).

Według opinii Fillmore (2004) nie ma dowodów na mierzalne zmiany w betonie pod wpływem dawek promieniowania neutronowego poniżej  $10^{10}$  n/cm<sup>2</sup>, ani promieniowania  $\gamma$  poniżej  $10^{10}$  Gy w wyniku eksploatacji osłon przez okres ok. 50 lat. Skutki dłuższych okresów napromieniowania nie były badane.

Wobec konieczności poznania wpływu przekroczenia wartości krytycznych oraz możliwości takiego przekroczenia w okresie użytkowania urządzeń związanych z energią jądrową, zestawienia różnych publikowanych wyników traktowane są jako wstęp do przeprowadzenia odpowiednich badań. Jest to istotne dla oceny stanu starzejących się elektrowni jądrowych, składowisk materiałów radioaktywnych i podobnych instalacji, przy czym najważniejsze jest napromieniowanie betonu w obudowach reaktorów jądrowych. Celem badania wpływu promieniowania jest odpowiednie projektowanie nowych elektrowni, przystosowanych do długotrwałej eksploatacji.

## 2.4. Anizotropia ziaren kruszywa

Ziarna kruszyw w betonach osłonowych mogą mieć różne właściwości wzdłuż trzech ortogonalnych kierunków; w szczególności dotyczy to współczynników odkształcalności i rozszerzalności termicznej. Te różnice powodują dodatkowe naprężenia w matrycy cementowej, na skutek czego powstają naprężenia i pojawiają się mikrorysy, zwłaszcza pod wpływem cyklicznych obciążeń mechanicznych albo zmian temperatury, związanych z kolejnymi etapami funkcjonowania osłanianego reaktora. Takie właściwości mają na przykład ziarna magnetytu (rys. 1), który jest kruszywem stosowanym w ścianach osłonowych.



Rys. 1. Ziarno kruszywa magnetytowego, Brandt i in. (2014)

## 3. Skutki napromieniowania osłon betonowych

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

Mechanizmy tłumiące w betonie są odmienne w przypadku promieniowania  $\gamma$  i promieniowania neutronowego. Osłanianie przed promieniowaniem  $\gamma$  jest względnie dokładnie modelowane w postaci trzech różnych procesów, natomiast zatrzymywanie neutronów jest procesem złożonym, przy czym powstaje drugorzędne promieniowanie  $\gamma$ , Kaplan (1989).

W obu przypadkach znacznie lepiej poznane są metody i wyniki osłaniania przed promieniowaniem i określanie niezbędnych grubości osłon z odpowiednio zaprojektowanych betonów, niż przewidywanie wpływu promieniowania na beton osłon. Zarówno prostsze są modele obliczeniowe, jak i układy doświadczalne.

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 do  $8 \cdot 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup>, Fillmore (2004). Również badania przeprowadzone w Hanford (USA) przy napromieniowaniu ocenianym na  $2 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> i w temperaturze 120°C doprowadziły do stwierdzenia braku istotnych zmian w wytrzymałości betonów. Jednakże w publikacji przygotowanej przez zespół z ORNL, Remec i in. (2013), rozpatrywano zmiany właściwości betonu ze względu na przewidywane przedłużenie eksploatacji reaktorów jądrowych w USA do 80 lat, a nawet powyżej.

## 4. Wartości krytyczne dawek napromieniowania

### 4.1. Informacje zebrane przez Ablewicza i Dubrowskiego (1986)

Podane informacje ilościowe dotyczą promieniowania  $\gamma$ , gęstości strumieni neutronów, opuszczających reaktor  $5 \cdot 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup> s, oraz strumienia neutronów z izotopowego źródła  $10^3$ – $10^4$  n/cm<sup>2</sup> s.

Wartości charakteryzujące promieniowanie  $\gamma$  są następujące:

- za zbiornikiem reaktora  $10^{13}$  MeV/cm<sup>2</sup> s,
- ze źródła izotopowego  $10^2$ – $10^3$  MeV/cm<sup>2</sup> s,

przy czym te wartości mogą być odmienne w różnych urządzeniach.

Strumienie neutronów w rdzeniu reaktorów energetycznych osiągają  $10^{13}$ – $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> s, a nawet  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup> s, natomiast poza reaktorem jest o 2–3 rzędy niższy. Promieniowanie działające na osłony i konstrukcje budowlane może osiągać:  $10^{12}$ – $10^{13}$  n/cm<sup>2</sup> s i  $10^{12}$ – $10^{13}$  MeV/cm<sup>2</sup> s; co w przypadku 30-letniej eksploatacji może powodować napromieniowanie osłon i konstrukcji rzędu  $10^{21}$ – $10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> oraz  $10^{11}$ – $10^{12}$  Gy.

Przewody betonowe prowadzące media chłodzące w obiegu pierwotnym mogą dawać  $10^7$ – $10^8$  MeV/cm<sup>2</sup>s, a w okresie 30 lat dawka pochłonięta może wynosić  $10^6$ – $10^8$  Gy. Osłony zbiorników z produktami rozpadu mogą podlegać promieniowaniu rzędu  $10^{10}$ – $10^{12}$  MeV/cm<sup>2</sup>s, co w skali jednego roku powoduje napromieniowanie  $10^7$ – $10^8$  Gy.

Badania prowadzone w ZSRR w latach 70. i wcześniej uzasadniały opinię, że przy napromieniowaniu  $2$ – $7 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> powstają niewielkie rysy w betonie, spadek współczynnika odkształcalności liniowej wynosi ok. 25%, spadek wytrzymałości na ściskanie o 26%, a na rozciąganie do 46%; zmiany te były różne i zależne od rodzaju kruszywa.

Zmiany właściwości betonu przypisywane były różnym czynnikom, głównie:

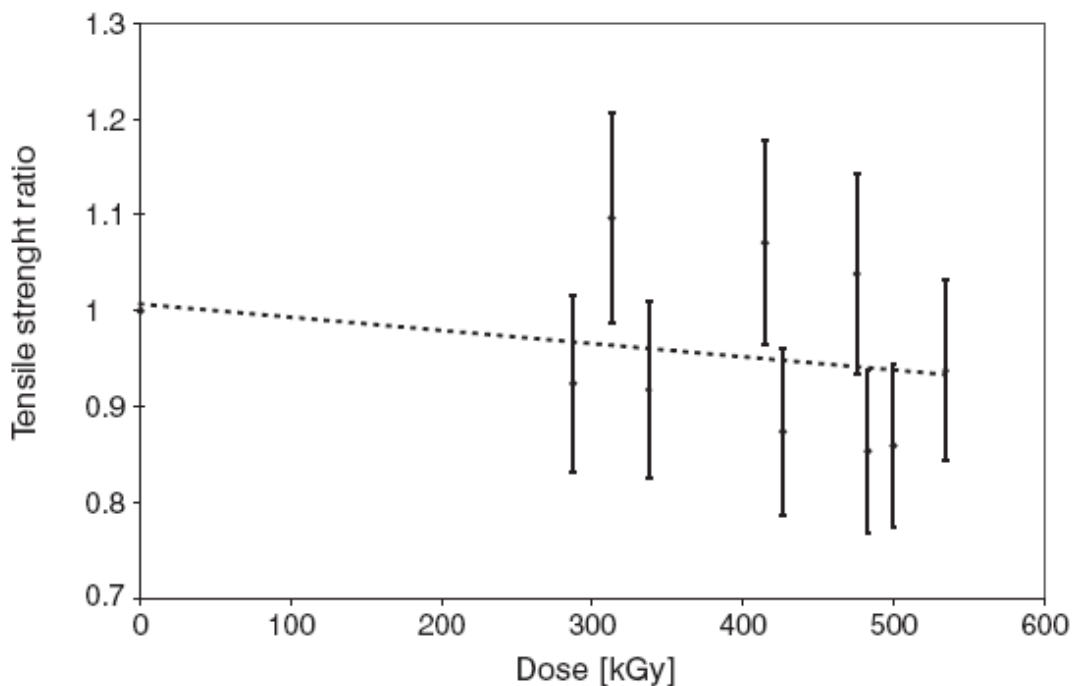
- uszkodzeniom w fazie krystalizacyjnej kruszyw, które wywołują dodatkowe odkształcenia,
- anizotropią właściwości ziaren kruszywa, powoduje naprężenia wewnętrzne i mikropęknięcia w matrycy cementowej, a te zjawiska mogą powodować rysy i pęknięcia w elementach betonowych, które powodują dalsze procesy niszczenia betonu.

Promieniowanie ma także wpływ na matrycę cementową, która może wykazywać zarysowanie, spowodowane odkształceniami ziaren kruszywa (rys. 1). Niektórzy badacze uznają za wskazane zmniejszenie ilości kruszywa w betonie oraz ograniczenie rozmiarów ziaren, ponieważ zakres możliwych uszkodzeń zależy głównie od rodzaju i składu granulometrycznego kruszywa.

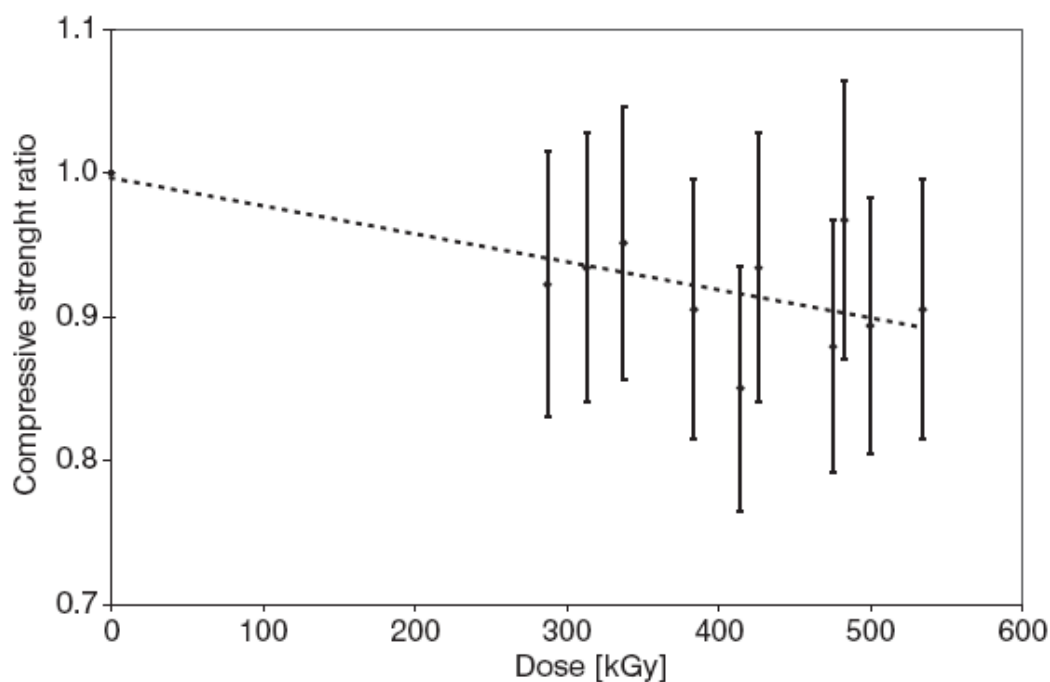
### 4.2. Wyniki badań według różnych autorów

Sopko i in. (2004) przedstawili wyniki poddania zwykłego betonu konstrukcyjnego po 90 dniach dojrzewania promieniowaniu  $\gamma$  w zakresie od 300 do 550 kGy. Wytrzymałość próbek  $0,4 \times 0,1 \times 0,1$  m określono z dużymi rozrzutami, ale średnie wartości wykazały spadek o 5% w przypadku rozciągania przy rozłupywaniu i o 10% przy ścisaniu w stosunku do próbek nie poddanych promieniowaniu, rys. 2 i 3.

Badania opisane przez Vodáka i in. (2005) obejmowały zakres napromieniowania próbek od 420 do 500 kGy i w pełni potwierdziły wyniki opisane powyżej. Stwierdzono także spadek porowatości próbek powyżej 50% przez pojawienie się kalcytu  $\text{CaCO}_3$ . Nastąpiła więc karbonizacja spowodowana napromieniowaniem, na co wskazuje pojawienie się produktów karbonizacji w całej objętości próbek, a nie tylko w pobliżu powierzchni zewnętrznej.



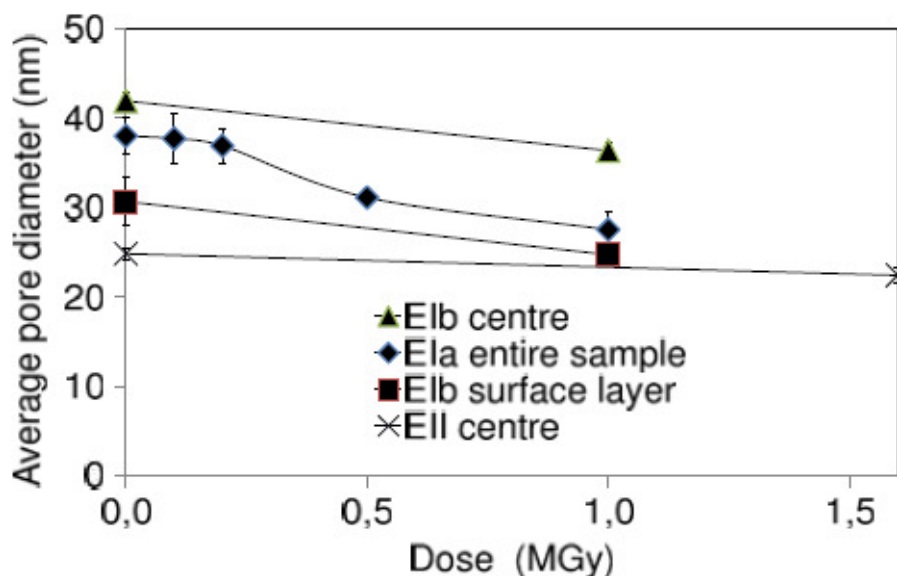
Rys. 2. Wpływ promieniowania  $\gamma$  na wytrzymałość betonu na rozciąganie, Sopko i in. (2004)



Rys. 3. Wpływ promieniowania  $\gamma$  na wytrzymałość betonu na ściskanie, Sopko i in. (2004)

Późniejsze badania zespołu Vodák i in. (2011) wskazały na zmniejszanie się średnicy porów wraz ze wzrostem dawki napromieniowania. Stwierdzono częściowe wypełnienie porów kalcytem przy czym oprócz naturalnej karbonizacji w warstwie zewnętrznej, pod wpływem promieniowania, nastąpiło częściowe wypełnienie porów kalcytem pod wpływem promieniowania, rys. 4. Stwierdzono spadek wytrzymałości paneli żelbetowych i zmianę sposobu zniszczenia od zerwania stali do kruszenia betonu i zmniejszenia odkształcalności.





Rys. 4. Spadek średnicy porów w różnych miejscach próbki betonu w funkcji napromieniowania, Vodák i in. (2011)

Mirhosseini (2010) określiła wartości krytycznych dawek napromieniowania na beton w konstrukcjach i stwierdziła, że:

- przy napromieniowaniu od  $2 \cdot 10^{19}$  do  $2 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> spadek wytrzymałości na ściskanie wynosi 35–80%;
- wytrzymałość na rozciąganie jest silniej zmniejszona, np. o 20 do 80% przy fluencji  $5 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>.

Na podstawie badań doświadczalnych określono trzy poziomy:  $2 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $2 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> i  $2 \cdot 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup> jako wartości krytyczne napromieniowania, na które mogą być narażone konstrukcje żelbetowe w elektrowniach jądrowych. Są to przede wszystkim ściany, analizowane na podstawie informacji, uzyskanych z rzeczywistych elektrowni. Wytrzymałość na ścinanie z rozciąganiem była wyraźnie zmniejszona w silnie zbrojonych (1,35–1,88%) elementach po napromieniowaniu  $2 \cdot 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup>. Żelbetowe panele poddane dwuosowemu ścinaniu i jednokierunkowemu ściskaniu wykazały znaczne osłabienie po napromieniowaniu  $2 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> i  $2 \cdot 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup>. Formy zniszczenia były różne: od zerwania zbrojenia do zniszczenia przez ścinanie przy zbrojeniu od 0,9 do 1,88%. Ciągliwość paneli żelbetowych była mniejsza po krytycznych wartościach napromieniowania.

Według Fillmore (2004) dawki promieniowania neutronowego powyżej  $10^9$  n/cm<sup>2</sup> =  $10^{13}$  n/m<sup>2</sup> i promieniowania  $\gamma$  o wartości  $1 \cdot 10^9$  Gy mogą spowodować zmiany wytrzymałości w niektórych betonach, przy czym najbardziej dotyczy to wytrzymałości na rozciąganie. Napromieniowanie dawką  $>10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> może wywołać także znaczne zmiany objętości. Według tego autora nie wydaje się, aby niewielkie dawki promieniowania  $<10^{10}$  n/cm<sup>2</sup> lub  $10^{10}$  Gy promieniowania  $\gamma$ , przez okres krótszy niż 50 lat miały znaczący wpływ na beton, co jest zgodne z obowiązującymi normami ASME i ANSI. Dłuższe okresy ponad 100 lat nie są rozpatrywane ze względu na ograniczenie eksploatacji reaktorów jądrowych.

Według raportu William i in. (2013) wytrzymałość próbek betonowych po dawce promieniowania  $\gamma$  o wartości  $5 \cdot 10^5$  Gy była mniejsza o ok. 10% w porównaniu do próbek nie napromieniowanych.

Badania przedstawione przez Fujiwara i in. (2009) nie wykazały zmian właściwości i struktury betonu po napromieniowaniu dawką o fluencji  $12,0 \cdot 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup>.

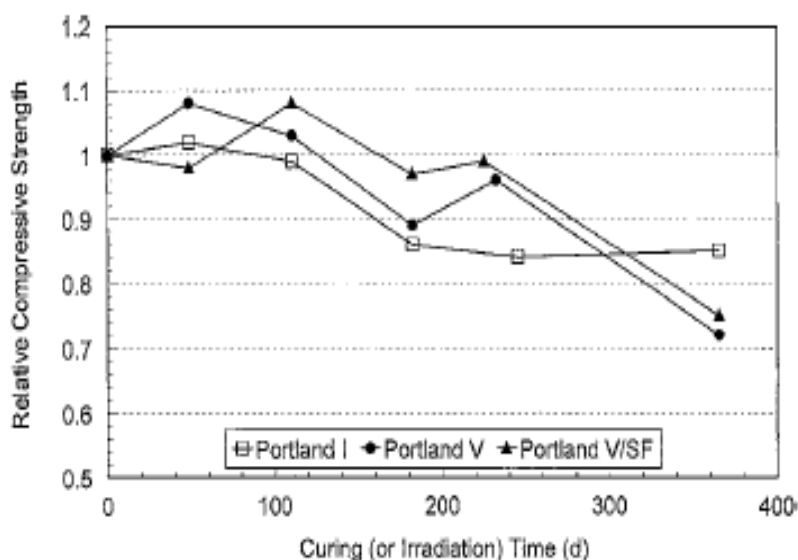
Przedstawione wyniki badań prowadzą do różnych wniosków. Wpływ dużych dawek promieniowania nie jest dostatecznie poznany i określony wobec rozmaitych warunków prowadzenia badań przez różnych autorów. W przypadku niektórych betonów stwierdzono, że dawki powyżej  $10^{10}$  n/cm<sup>2</sup> mogą spowodować zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie, znaczne zmiany objętości spowodowane pęcznieniem ziaren kruszywa. Nie zostało jednoznacznie wyjaśnione, czy te zmiany są spowodowane podwyższoną temperaturą czy promieniowaniem, choć uszkodzenia są zauważalne. Niewątpliwie zależy to od rodzaju strumienia neutronów i składu betonu.

### 5. 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, a połączenie promieniowania z dwóch różnych źródeł też może przynieść nowe rezultaty.

Podwyższona temperatura betonu może być przyczyną dodatkowych naprężeń ze względu na różnicę współczynnika odkształcalności termicznej matrycy cementowej i ciężkiego kruszywa. Callan (1952) 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 (2001) badali wpływ napromieniowania  $\gamma$  na wytrzymałość konwencjonalnych zapraw cementowych. Badania były ograniczone do zapraw ze względu na konieczność zachowania wymiarów próbek do sześcianów o boku 2,54 cm. Próbki 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%, (rys. 5).



Rys. 5. Spadek wytrzymałości na ściskanie matrycy cementowej wraz czasem dojrzewania i napromieniania, Soo, Millian (2001)

Te badania prowadzone były głównie 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 rzędu  $10^5$  Gy. Przyczyny spadku wytrzymałości po napromieniowaniu nie zostały określone; mogą być związane z utratą wody związanej w cemencie i wody w porach.

W raporcie przygotowanym dla potrzeb normalizacji w USA przez zespół William i in. (2013) zestawiono wartości krytyczne napromieniowania według różnych przepisów. Ogólny wniosek z tego opracowania można sprowadzić do następujących krytycznych wartości napromieniowania:

- prędkich neutronów  $1 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>.
- promieniowania  $\gamma$   $2 \cdot 10^8$  Gy.

Według Fillmore (2004) i Mirhosseini (2010) pierwotne osłony mogą otrzymywać  $5 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>. Betonowe obudowy reaktorów mogą być wystawione na działanie termicznych i prędkich neutronów oraz promieniowania  $\gamma$  w ciągu 30 lat o wartościach odpowiednio ok.  $6 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $2\text{--}3 \cdot 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup> oraz  $1 \cdot 10^9$  Gy. Dawniejsze wyniki badań w UK wskazały na stały strumień ok.  $3 \cdot 10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>s, co odpowiada fluencji  $3,78 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> po 40 latach, Alexander (1963).

- Przyjęte wartości krytyczne były różne wg różnych krajowych zaleceń w latach 1960–1980:
- wg Jaegera (1975) uszkodzenia spowodowane nagraniem jest ważniejsze niż przez napromieniowanie. Zalecono jednak, aby strumień (gęstość) neutronów był ograniczony do  $5 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>s, a promieniowanie  $\gamma$  o mocy 1 MeV powinno być ograniczone do  $4 \cdot 10^{10}$  n/cm s;
  - wg ASME graniczna wartość to  $1 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>;
  - w UK dla konstrukcji sprężonych określono, że choć nie jest możliwe ustalenie dokładnie skutków promieniowania neutronowego na beton, to przy wartości poniżej  $5 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> można uważać te efekty za nieznaczne;
  - wg ANSI/ANS (2006) wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie oraz moduł sprężystości mogą ulegać degradacji przy dawce powyżej  $1 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> albo promieniowania  $\gamma$  powyżej  $10^8$  Gy.
  - w zaleceniach ACI 349.3R-2002 zaproponowano niższe wartości jako bezpieczne ze względu na możliwość degradacji betonu po długotrwałej ekspozycji i dawkach powyżej rzędu  $1 \cdot 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup> oraz także  $10^8$  Gy.

Powyższe wartości dotyczą elementów najbardziej narażonych na promieniowanie, przyjmując znacznie mniejsze dawki w pozostałych fragmentach konstrukcji.

Konno (2002) 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 godzinach funkcjonowania reaktora. Na poziomie reaktora, beton w biologicznej osłonie otrzymał dawkę  $1,11 \cdot 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup> 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 wzrastała aż do  $10^{17}$  n/cm<sup>2</sup>, a trwałość osłony betonowej pokrytej płaszczem stalowym nie uległa zmniejszeniu pomimo nagrzewania od strumienia neutronów i promieniowania  $\gamma$ . Osłonę wykonano z betonu zwykłego o wytrzymałości na ściskanie 35 MPa; osłona ta była chłodzona przez system rur, ułożonych od strony reaktora. Obliczone wartości promieniowania korygowano doświadczalnie przy użyciu izotopu Eu-152.

Ichikawa i Kimura (2007) stwierdzili, że promieniowanie  $\gamma$  nie powoduje degradacji betonu aż do dawki  $1 \cdot 10^{10}$  Gy. Napromieniowanie prędkimi neutronami powyżej fluencji  $5 \cdot 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> 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) w 2012 r. określono próg promieniowania  $\gamma$  na  $1.10^8$  Gy. W raporcie ACI 349.3R-02 (2002) przedstawiono podstawowe wymagania w stosunku do konstrukcji betonowych.

Maruyama i in. (2013) opisali przygotowania do badania wpływu napromieniowania na beton, krytycznie zestawiając dotychczasowe wiadomości na ten temat. Jako wartości progowe napromieniowania betonu przyjęto w Japonii:

- $1.10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> w przypadku szybkich neutronów, oraz
- $2.10^{10}$  rad =  $2.10^8$  Gy w przypadku promieniowania  $\gamma$ .

To założenie oznacza, że konstrukcje betonowe są uznane za bezpieczne dopóki te wartości nie są przekroczone, nawet po okresie eksploatacji ponad 30 lat. Oparto się tu na publikacji Hilsdorfa (1978), chociaż w obecnie budowanych reaktorach typu LWR (Light-Water-Reactor) warunki napromieniowania betonowych osłon są odmienne. Krytyka wniosków przedstawionych w tej publikacji jest oparta na okoliczności, że zebrano wyniki różnych badań, przeprowadzonych w różnych warunkach. Jednak uznano za potwierdzony spadek wytrzymałości betonu pod wpływem odpowiedniej dawki neutronów, np. powyżej  $5.10^{19}$ , chociaż brakuje wyników doświadczalnych.

Przeprowadzone badania wstępne wykazały pęcznienie ziaren kruszywa krzemianowego pod wpływem obu rodzajów promieniowania, przy czym to zjawisko rośnie wraz z gęstością kruszywa. 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 (2014) badali w podwyższonej temperaturze do 500 i 750°C beton z barytowym kruszywem. W porównaniu do zwykłego betonu konstrukcyjnego stwierdzono wyższą wytrzymałość na ściskanie po cyklicznym ogrzewaniu do 500°C i chłodzeniu, 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 mają bliskie wartości, co powoduje brak poważnych naprężeń w warstwie stykowej podczas cyklicznych zmian temperatury w osłonie z betonu barytowego. Jednym z objawów napromieniowania jest zmiana porowatości w warstwie przyściennej. Porowatość betonu barytowego ulegała niewielkim zmianom po ogrzaniu, polegającym na niewielkim wzroście średnicy porów. Kruszywo barytowe nie ułatwia przygotowania betonu dobrej jakości, González-Ortega i in. (2015).

W świetle tych wyników badań okazuje się, że wartości krytyczne napromieniowania betonu zostały w przybliżeniu określone; są zależne od składu betonu, tzn. przede wszystkim od kruszywa. Również rodzaj neutronów i energia promieniowania  $\gamma$  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 różnorodność wyników publikowanych w różnych źródłach, przypisując to niejednakowym warunkom prowadzenia badań i stosunkowo małej liczności badanych próbek. Dalsze badania są niezbędne, ponieważ starzenie się elektrowni atomowych wskazuje na konieczność określenia granic ich użytkowania.

## 6. Wpływ łącznych oddziaływań na konstrukcje betonowe

Konstrukcje osłonowe podlegają łącznemu oddziaływaniu, wynikającemu z obciążeń mechanicznych i termicznych, wpływom promieniowania i czynników atmosferycznych, ewentualnie także agresji chemicznej wód opadowych i podziemnych, a także procesom starzenia w postaci np. karbonatyzacji, reakcji alkalicznej kruszywa, korozji stali zbrojeniowej i sprężającej. Wymienione oddziaływania występując łącznie, stwarzają w sposób oczywisty efekty

synergistyczne, np. zmniejszenie szczelności betonu powoduje wzrost korozji i ewentualnie inne formy uszkodzenia struktury betonu w konstrukcjach i osłonach.

Procesy narastania uszkodzeń w betonowych konstrukcjach, poddanych wymienionym różnorodnym oddziaływaniom, są niedostatecznie poznane, zwłaszcza w odniesieniu do wieloletnich okresów eksploatacji, William i in. (2013). Co więcej, modele narastania uszkodzeń stosowane w poprzednich okresach, m.in. publikowane przez Hilsdorfa i in. (1978) odnoszą się do konstrukcji reaktorów i innych urządzeń, które są odmienne od projektowanych i budowanych obecnie. Obecnie stosowane metody projektowania betonu mają na celu zapewnienie zachowania niezbędnych właściwości w okresie eksploatacji, jednak brakuje sprawdzonych modeli, określających trwałość betonu w określonych warunkach. Konstrukcje te muszą być systematycznie kontrolowane doświadczalnie, aby przeprowadzać ewentualne naprawy, Naus (2009).

## 7. Przykłady awarii w elektrowniach jądrowych

Trwałość konstrukcji betonowych wpływa w niewielkim stopniu na bezpieczeństwo w elektrowniach jądrowych, ponieważ powolna degradacja osłon i innych konstrukcji jest wykrywana i likwidowana, a największe awarie nie były związane z jakością betonu.

W ośrodku badań jądrowych Chalk River Laboratories (Ontario, Kanada), zanotowano dwie poważne awarie. W 1952 r. uszkodzony został rdzeń reaktora badawczego NRX, a w 1958 r. doszło do uszkodzenia wymienianego elementu paliwowego z rdzenia reaktora NRU. W obu wypadkach konieczne było usunięcie substancji radioaktywnych z pomieszczeń reaktorów. Nie wystąpiło w tych wypadkach poważniejsze zagrożenie środowiska przez materiały radioaktywne.

Katastrofa z 10 października 1957 r. w Windscale (Cumberland, Wielka Brytania) znana jest szerzej jako „pożar w Windscale”. Doszło wówczas do samozapłonu grafitu w rdzeniu wojskowego reaktora służącego do produkcji plutonu i chłodzonego powietrzem atmosferycznym. Operatorzy nie wiedzieli, jak zachować się w obliczu niebezpieczeństwa. Ich pierwszą reakcją było ustawienie pracy dmuchaw chłodzących na maksymalne obroty, co jeszcze pogorszyło sytuację przez dostarczenie tlenu płonącemu grafitowi. W efekcie nastąpiło wyrzucenie w powietrze radioaktywnego izotopu jodu 131 i skażenie otoczenia. W następstwie tej katastrofy reaktory chłodzone powietrzem nie były później budowane.

W elektrowni w pobliżu Harrisburga (Pennsylvania, USA) w 1979 r. nastąpiło stopienie rdzenia reaktora i wydostanie się poważnych ilości materiałów radioaktywnych. Błędy w akcji ratowniczej doprowadziły do przejściowego zahamowania w budowie następnych elektrowni i modyfikacji wymagań bezpieczeństwa.

We Francji w latach 1969–2009 w elektrowniach jądrowych zarejestrowano kilkanaście awarii o niewielkim znaczeniu, które nie wynikały z uszkodzeń betonowych osłon. Obecnie działa 58 elektrowni, zapewniając ok. 70% zapotrzebowania kraju na energię elektryczną

Katastrofa elektrowni atomowej w Czarnobylu (Ukraina) w 1984 r. jest opisana w wielu wydawnictwach i tak jak poprzednie nie miała związku z jakością i trwałością osłon betonowych. Podobnie katastrofa w elektrowni w Fukushima w Japonii w 2010 r., która została wywołana falą tsunami.

W kilku ostatnich dziesięcioleciach nastąpiło szereg awarii w elektrowniach atomowych, które nie miały poważniejszych skutków, ani nie były szczegółowo opisywane, np. w elektrowni Trojan (OR) uruchomionej w 1975 r. w Stanach Zjednoczonych i zamkniętej w 1995 r. ze względu na wykryte błędy fundamentowania budynku reaktora.

Przykładem wystąpienia uszkodzeń konstrukcji betonowych jest sytuacja w elektrowni jądrowej w Seabrook w Stanach Zjednoczonych (NH), która została uruchomiona w roku 1990.

Podczas badań kontrolnych w roku 2010 stwierdzono tam liczne uszkodzenia w konstrukcjach betonowych zabezpieczających reaktor, (US NRC 2011). Badania wykazały rysy i poważne pęknięcia betonu, spowodowane reakcją alkaliczną kruszywa, związaną z oddziaływaniem wody gruntowej i podwyższonej temperatury, Saouma, Hariri-Ardebili (2014). Po wstępnych badaniach nie zatrzymano funkcjonowania reaktorów i przystąpiono do kompleksowych sprawdzeń i napraw. Jest to pierwszy przypadek odkrycia reakcji alkalicznej, będącej przyczyną tak znacznych uszkodzeń betonu w elektrowni jądrowej, a przynajmniej ujawnienia spowodowanych tym uszkodzeń. Obszerne badania zakresu uszkodzeń i sposobów zapewnienia bezpieczeństwa podjęte w 2012 r. są nadal prowadzone, Next Era Energy (2014), NRC Inspection Report (2015). Nie zauważono uszkodzeń osłon betonowych, spowodowanych promieniowaniem. Zapewne w przypadkach podobnych sytuacji w innych elektrowniach jądrowych przyczyny były takie same, jednak nie zawsze publikowano wyniki, Naus (2009).

W 2013 r. przystąpiono do zakończenia eksploatacji w USA czterech elektrowni jądrowych (pięć reaktorów) z pośród 104 działających, ale nie ma informacji o degradacji konstrukcji betonowych, spowodowanych promieniowaniem czy z innych przyczyn.

## 8. Trwałość osłon betonowych

Najważniejszym elementem elektrowni jądrowej jest reaktor w zbiorniku ciśnieniowym, a wymagania bezpieczeństwa obejmują wszelkie stany eksploatacyjne i awaryjne przez cały okres użytkowania. Te wymagania doprowadziły do ograniczeń okresu użytkowania, początkowo w przypadku tzw. reaktorów I generacji do 30 lat, a następnie kolejno reaktorów II generacji do 60 lat, a III do 80 lat. To przedłużanie czasu eksploatacji obserwujemy we wszystkich krajach, w których tworzona jest energetyka jądrowa, a ograniczenia są związane przede wszystkim z rozwojem metalurgii. Takie przesłanki mają znaczenie orientacyjne i ulegają różnym ocenom i korektom w poszczególnych przypadkach; trudno przewidzieć dalszy ich rozwój.

Wymagania w stosunku do osłon betonowych w elektrowniach jądrowych obejmują łącznie zachowanie trwałości wobec wszystkich oddziaływań w stanach użytkowania, a równocześnie 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 powstawania tych reakcji w zwykłych konstrukcjach żelbetowych są dosyć dobrze rozpoznane. Natomiast przy oddziaływaniu promieniowania jonizującego i podwyższonej temperatury w osłonach powstają warunki sprzyjające jej wystąpieniu nawet w przypadku kruszyw o niewielkiej podatności na te zjawiska. W obecnym stanie wiedzy konieczne są dalsze badania, aby drogą odpowiedniej selekcji kruszyw i doboru cementów całkowicie wyeliminować to zagrożenie.

Oba rodzaje promieniowania:  $\gamma$  i neutronowe, są zatrzymywane lub odpowiednio tłumione przez osłony o wysokiej gęstości oraz zawierające trwale dostateczne ilości wody. Stal i beton spełniają te wymagania w różnym stopniu i zakresie, a w przybliżeniu można przyjąć, że przy jednakowej grubości osłony, promieniowanie pierwotne i wtórne  $\gamma$  jest zatrzymywane proporcjonalnie do ich gęstości. Przegroda betonowa powinna więc mieć dostateczną gęstość, zawierając ciężkie kruszywa, aby spowalniać prędkie neutrony, a jednocześnie musi zawierać 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 temperatura jest wyższa. Ilość

wody związanej w matrycy cementowej musi być uzupełniona przez wodę związaną w kruszywie i składniki zawierające minerały o niskiej liczbie atomowej, np. bor.

Dodatkowym ograniczeniem jest unikanie nawet śladowych ilości w kruszywie i w cemencie takich pierwiastków, które mogłyby wywołać szkodliwe zjawiska, np. wtórnego promieniowania  $\gamma$ .

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 w stosunku do 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. Niezbędnym warunkiem bezpiecznego użytkowania są systemy kontroli, które są szczegółowo opracowywane i opisywane w materiałach publikowanych m.in. IAEA i US Nuclear Regulatory Commission.

Referat został przygotowany w ramach Projektu "Trwałość i skuteczność betonowych osłon przed promieniowaniem jonizującym w obiektach energetyki jądrowej", PBSII/A2/15/2014.

### Literatura

1. Ablewicz Z., Dubrowski W.B. (1986). Osłony przed promieniowaniem jonizującym. Arkady, Warszawa, 300 s.
2. Alexander S.C. (1963). Effects of irradiation on concrete. Final results. Atomic Energy Research Establishment, Harwell, 34 s.
3. Brandt A.M. (2008). Trwałość obiektów inżynierski a zrównoważony rozwój. Konf. Krynicka, t. IV, 160–183.
4. Brandt A.M. (2013). Beton jako materiał osłon w budownictwie związanym z energetyką jądrową. Cement Wapno Beton, Polski Cement, 2, 115–132.
5. 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.
6. Brandt A.M., Józwiak-Niedźwiedzka D., Nowowiejski G., Denis P. (2014). Wyniki badania betonu osłonowego z kruszywem magnetytowym. Dni Betonu 2014, 839–850
7. Callan E.J. (1952). Thermal expansion of aggregates and concrete durability. J.Amer.Concr.Inst. Proceedings, Feb. 48, page 485; discussion Dec., 504–511.
8. Callan E.J. (1953). Concrete for radiation shielding, JACI Proceedings, Sept.vol.50, 17 s.
9. 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.
10. Fujiwara K., Ito M., Sasanuma M., Tanaka H., Hirofani K., Onizawa K., Suzuki M., Amezawa H. (2011). Experimental Study of the Effect of Radiation Exposure to Concrete. SMiRT 20, Espoo, Finland, August 9–14, 2009, Paper 1891, 8 s.
11. 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.of Buil.Mat., 74, 169–175.
12. Hilsdorf H.K., Kropp J., Koch H.J. (1978). The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete. ACI, SP 55–10, 223–251.
12. 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.
13. Jaeger R.G. ed. (1975). Engineering Compendium on Radiation Shielding. Springer-Verlag, 436 s.
14. Kaplan M.F. (1989). Concrete radiation shielding. Longman Scientific and Technical, 457 s.
15. 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.

16. Kontani, O., Ichikawa, Y., Ishizawa, A., Takizawa, M. & Sato, O. (2010). "Irradiation Effects on Concrete Structures", Proc. of International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants, 173–182.
17. Lo Monte F., Gambarova P.G. (2014). Thermo-mechanical behavior of baritic concrete exposed to high temperature. *Cem.&Concr. Comp.*, 53, 305–315.
18. 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.
19. Mirhosseini S.S. (2010). The effects of nuclear radiation on Aging reinforced concrete structures in nuclear power plants, MA Thesis, Waterloo University, 154 s.
20. Naus D.J., Oland C.B., Ellingwood B.R., Hookham C.J., Graves H.L III (1999). Summary and conclusions of a program addressing aging of nuclear power plant concrete structures. *Nucl.Eng.and Design*, 194, 73–96
21. Naus D.J., (2009). The management of aging in nuclear power plant concrete structures. *JOM, Journal of Electronic Materials, and Metallurgical and Materials Transactions*, vol.61, no 7, 35–41
22. Remec I., Field K.G., Naus D.J., Rosseel T.M., Busby J.T. (2013). Concrete aging and degradation in NPPs: LWRS Program R&D Progress Report, Trans. of the Amer.Nucl.Soc., vol. 109, Washington, D.C.
23. Saouma V.E., Hariri-Ardebili M.A. (2014). A proposed aging management program for alkali silica reactions in a nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design*, 277, 248–264.
24. 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.
- Sopko V., Trtík K., Vodák F., (2004). Influence of  $\gamma$  irradiation on concrete strength. *Acta Polytechnica*, 44, 1, 57–58.
25. Vodák F., Trtík K., Sopko V., Kapičková O., Demo P. (2005). Effect of  $\gamma$ -irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures. *Cem.&Concr. Res.*, 35, 1447–1451.
26. Vodák F., Vydra V., Trtík K., Kapičková O. (2011). Effect of gamma irradiation on properties of hardened cement paste. *Materials and Structures*, 44, 101–107.
27. 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.
28. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (2009). Recommendations for preventing disorders due to Delayed Ettringite Formation. Guide technique, 63 s.
29. ACI 349.3R-02 (2002). Evaluation of existing nuclear safety-related concrete structures, 18 s.
30. Next Era Energy (May 15, 2014). Response to Requests for Additional Information, 34 s.
31. NRC Inspection Report (Feb. 6, 2015). ASR Problem Identification and Resolution Sample, 41 s.
32. United States Nuclear Regulatory Commission (2011). NRC License Renewal Inspection Report, 31 s.

## DURABILITY OF CONCRETE IN THE STRUCTURES BUILT FOR THE NUCLEAR ENERGY

**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.