ARCHITEKTURA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ARCHITECTURE
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-A/2/2011
ZESZYT 11
ROK 108
ISSUE 11
YEAR 108

TERESA ZYCH*

TRWAŁOŚĆ WSPÓŁCZESNEGO BETONU W UJĘCIU NORM EUROPEJSKICH

DURABILITY OF CONTEMPORARY CONCRETE IN EUROPEAN STANDARDS

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie trwałości współczesnego betonu w świetle postanowień norm europejskich (normy betonowej PN-EN 206-1 i Eurokodów dotyczących konstrukcji z betonu: PN-EN 1990 Eurokod, PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2, cz. 1-1) oraz normy wzorcowej – „*fib*-Model Code 2010", opracowanej przez Międzynarodową Federację Betonu Konstrukcyjnego (*fib*) w 2010 roku. Podano zalecenia zawarte w normach dotyczące właściwości betonu i jego składu (minimalnej klasy wytrzymałości betonu, maksymalnej wartości wskaźnika wodno-cementowego, rodzaju i minimalnej ilości cementu) oraz grubości otuliny zbrojenia (w zależności od klas ekspozycji czyli warunków środowiskowych, w których beton jest eksploatowany).

Słowa kluczowe: *trwałość betonu*, *trwałość konstrukcji żelbetowych*, *klasy ekspozycji*, *fib Model Code 2010*

Abstract

The issue of durability of contemporary concrete according to European standards (PN-EN 206-1 concrete standard, concrete structure standards: PN-EN 1990 Eurocode, PN-EN 1992-1-1 Eurocode 2, part 1-1) and 'fib-Model Code 2010', published in 2010 by the International Federation for Structural Concrete (fib – federation internationale du beton) is presented in the paper. The recommendations included in the standards on the properties of concrete and its composition (minimum concrete strength class, maximum water/cement ratio, cement type and minimum quantity of cement) as well as the thickness of concrete cover (depending on the exposure classes, i.e. the environmental conditions in which concrete is used) are given.

Keywords: *concrete durability*, *durability of reinforced concrete structure*, *exposure classes related to environmental actions*, *fib Model Code 2010*

* Dr inż. Teresa Zych, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Coraz większe wymagania stawiane współcześnie przed technologami betonu przez architektów i konstruktorów prowadzą do powstawania nowych rodzajów betonu. W ostatnim dziesięcioleciu rozwój technologii kompozytów z matrycą cementową, szczególnie dzięki zastosowaniu nowej generacji domieszek (wysokoefektywnych superplastyfikatorów polikarboksylanowych) oraz dodatków mineralnych (pyłu krzemionkowego), pozwala na otrzymywanie kompozytów cementowych posiadających dotąd nie spotykane właściwości. Nowej generacji betonami są m.in. beton samozagęszczalny (ang. – SCC – *Self Compacted Concrete*), beton wysokowartościowy (ang. – HPC – *High Performance Concrete*). Beton samozagęszczalny, otrzymywany dzięki zastosowaniu nowej generacji superplastyfikatorów, cechuje się bardzo dobrą urabialnością i brakiem konieczności celowego zagęszczenia uformowanego w element betonu. Beton wysokowartościowy oprócz wysokiej wytrzymałości na ściskanie (klasy powyżej C50/60 według normy PN-EN 206-1 [30]) posiada także i inne cechy techniczne na podwyższonym poziomie, głównie niską przepuszczalność dla środowiskowych mediów ciekłych i gazowych oraz wysoką odporność na ścieranie (dzięki dużej szczelności betonu, ukształtowanej przez odpowiedni dobór składu betonu – m.in. dodatek pyłu krzemionkowego, niską wartość wskaźnika wodno-cementowego w/c i domieszek upłynniających nowej generacji), czyli cechy decydujące o wysokiej trwałości [3, 20].

Dla betonu zwykłego, w celu zapewnienia jego trwałości w różnych agresywnych warunkach środowiskowych, podano w dokumentach normatywnych (m.in. normie betonowej PN-EN 206-1 [31], Eurokodzie 2, cz. 1-1 (PN-EN 1992-1-1) (EC2) [35], normie wzorcowej *fib*-Model Code 2010 (MC2010) [30]) oraz poradniku „Eurokod 2 – Podręczny skrót dla projektantów konstrukcji żelbetowych" zalecenia odnośnie jego wytrzymałości na ściskanie i składu.

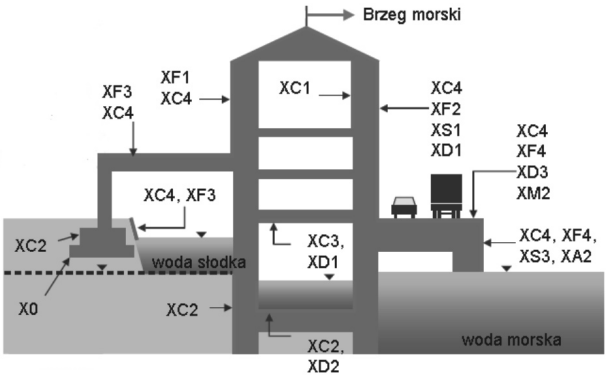
2. Korozja betonu w różnych warunkach oddziaływania środowiska

Podczas użytkowania beton narażony jest na działanie wielu czynników środowiskowych powodujących jego degradację. Proces niszczenia materiału w wyniku oddziaływania środowiska definiuje się jako **korozję** materiału. Warunki środowiskowe, w których znajduje się beton, określono w normie betonowej PN-EN 206-1 [31, 32] (oraz normie konstrukcyjnej żelbetowej EC2 [35] i MC2010 [30]) jako klasy ekspozycji. W przypadku konstrukcji żelbetowych agresywne oddziaływanie środowiska może wpływać destrukcyjnie nie tylko na beton, ale również na znajdującą się w nim stal zbrojeniową. Wyróżniono 7 klas ekspozycji – 6 klas ekspozycji (X0, XC, XD, XS, XF, XA) w normie PN-EN 206-1 [31] oraz jedną klasę ekspozycji (XM) w normie PN-B-06265 [33] (krajowym uzupełnieniu normy PN-EN 206-1), obejmujących następujące możliwości zagrożenia betonu (tab. 1):

- **X0** – brak zagrożenia agresją środowiska lub zagrożenia korozją,
- **XC** – korozja spowodowana **karbonatyzacją**,
- **XD** – korozja spowodowana **chlorkami** niepochodzącymi z wody morskiej,
- **XS** – korozja spowodowana **chlorkami** pochodzącymi z wody morskiej,
- **XF** – korozja poprzez **zamrażanie/rozmrażanie** (bez środków odladzających i ze środkami odladzającymi),
- **XA** – korozja spowodowana **agresją chemiczną**,
- **XM** – korozja spowodowana **ścieraniem**.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Każda klasa dzieli się na 3 lub 4 podklasy w zależności od intensywności oddziaływania środowiska (w przypadku klas ekspozycji XA i XM) lub stopnia nasycenia betonu wodą (w przypadku pozostałych klas) (tab. 1). Przykłady klas ekspozycji dla elementów obiektów budowlanych przedstawiono na il. 1.



Il. 1. Przykłady klas ekspozycji dla elementów obiektów budowlanych [29]

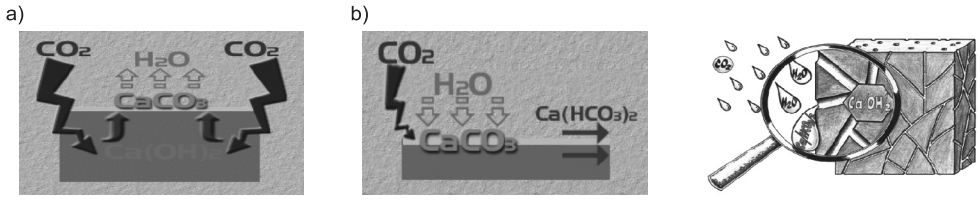
Ill. 1. The examples of exposure classes related to environmental conditions for the elements of buildings [29]

Ze względu na mechanizm przebiegu korozji wyróżnia się następujące rodzaje **korozji betonu**:

– korozja polegająca na rozpuszczaniu i wymywaniu rozpuszczonych składników (np. korozja **ługowania**),
– korozja polegająca na powstawaniu w wyniku reakcji chemicznych (pomiędzy materiałem i środowiskiem) łatwo rozpuszczalnych soli, które są wymywane (np. **karbonatyzacja**, korozja **kwasowa**, **amonowa**, **zasadowa**, **magnezowa**),
– korozja polegająca na powstawaniu trudno rozpuszczalnych soli (jako produktów reakcji), które krystalizując z przyłączeniem wody znacznie zwiększają swoją objętość (np. korozja **chlorkowa**, **siarczanowa**) [5, 11].

Klasa ekspozycji XC oznacza zagrożenie betonu **korozją węglanową (karbonatyzacją)**. Korozję węglanową (karbonatyzację) powoduje dwutlenek węgla CO_2 zawarty w powietrzu lub wodzie. W powietrzu atmosferycznym zawsze występuje pewna ilość dwutlenku węgla. Zawartość objętościowa CO_2 w atmosferze wynosi od 0,03% w rejonach nieuprzemysłowionych do 0,3% (a lokalnie nawet więcej) w dużych miastach bądź ciągach komunikacyjnych [6]. Proces korozyjny przebiega dwuetapowo. W pierwszym etapie CO_2 reagując z wodorotlenkiem wapniowym $Ca(OH)_2$ (składnikiem stwardniałego zaczynu cementowego w betonie) powoduje powstanie węglanu wapniowego $CaCO_3$ (trudno rozpuszczalnego związku chemicznego, który krystalizuje w porach betonu) [$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$] (il. 2a). Prowadzi to do stopniowego zobojętniania (obniżania alkaliczności) betonu. W drugim etapie w wyniku dalszego działania dwutlenku węgla i wody z węglanu wapniowego $CaCO_3$ tworzy się kwaśny węglan wapniowy (wodorowęglan wapniowy) $Ca(HCO_3)_2$, który jako dobrze rozpuszczalny związek chemiczny jest wymywany z betonu [$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2$] (il. 2b) [7, 11, 15, 20, 37]. Powoduje to wzrost porowatości betonu i obniżenie jego wytrzymałości.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Il. 2. Korozja węglanowa (karbonatyzacja): a – proces zobojętniania betonu – powstawanie węglanu wapniowego $CaCO_3$, b – powstawanie łatwo rozpuszczalnego wodorowęglanu wapniowego $Ca(HCO_3)_2$ [7, 37]

Ill. 2. Carbonation: a – neutralization of concrete – formation of calcium carbonate $CaCO_3$, b – formation of calcium dicarbonate (hydrocarbonate) $Ca(HCO_3)_2$ (easy soluble in water) [7, 37]

Przebieg procesu karbonatyzacji zależy od wilgotności względnej powietrza. W betonie suchym i całkowicie nasyconym wodą karbonatyzacja przebiega wolno lub proces nie występuje [6, 8, 24]. W bardzo suchym powietrzu beton nie ulega karbonatyzacji (ponieważ do rozpoczęcia procesu wymagana jest niewielka ilość wilgoci). W środowisku wodnym dyfuzja CO_2 przebiega znacznie wolniej niż w środowisku powietrznym. Szybkość dyfuzji CO_2 w wodzie jest około 10000 razy mniejsza niż w powietrzu [6, 24]. Dlatego przy całkowitym nasyceniu betonu wodą, gdy dyfuzja CO_2 przebiega jedynie w wodzie (którą wypełnione są pory), karbonatyzacja jest bardzo powolna. Największą szybkość karbonatyzacji obserwuje się, gdy wilgotność względna powietrza wynosi 50–70% [24].

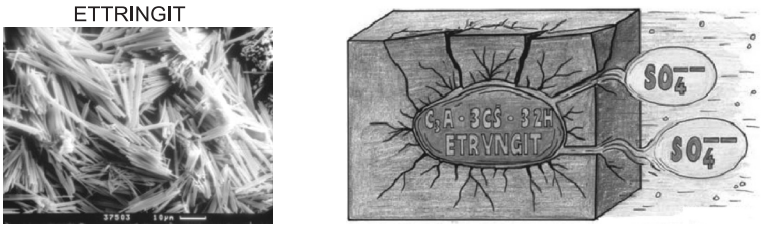
Klasy ekspozycji XD i XS wskazują na agresywne oddziaływanie chlorków niepochodzących (XD) i pochodzących z wody morskiej (XS), czyli na zagrożenie betonu **korozją chlorkową**. Korozję chlorkową powodują chlorki zawarte w wodzie morskiej, wodach kopalnianych oraz środki odladzające (NaCl, $CaCl_2$) stosowane w zimowym utrzymaniu dróg. Produktem reakcji jonów chlorkowych Cl^- z wodorotlenkiem wapniowym $Ca(OH)_2$ (składnikiem stwardniałego zaczynu cementowego) jest ekspansywny zasadowy chlorek wapnia $Ca(OH)_2 \cdot CaCl_2 \cdot H_2O$ (zwiększający swoją objętość w czasie krystalizacji i powodujący niszczenie betonu) [$Ca(OH)_2 + 2NaCl \rightarrow CaCl_2 + 2NaOH$, $Ca(OH)_2 + CaCl_2 + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \cdot CaCl_2 \cdot H_2O$]. Natomiast w obecności wody morskiej, zawierającej zarówno jony Cl^-, jak i jony Mg^{2+}, w wyniku reakcji $MgCl_2$ z $Ca(OH)_2$ powstaje zasadowy chlorek magnezu $2Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 2H_2O$, także posiadający właściwości ekspansywne [$2Ca(OH)_2 + 3MgCl_2 + 2H_2O \rightarrow 2Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 2H_2O + 2CaCl_2$] (zasadowe chlorki wapnia i magnezu tworzą się również w wyniku reakcji jonów chlorkowych z innymi produktami hydratacji cementu) [7, 15, 20, 24].

Klasa ekspozycji XF oznacza zagrożenie betonu **korozją mrozową**, czyli korozją wywołaną działaniem mrozu lub zarówno mrozu, jak i środków odladzających. Korozję mrozową powoduje woda zamarzająca w porach betonu, która przechodząc w lód, zwiększa swoją objętość (o około 9%). Tworzący się lód wypycha nie zamarzniętą jeszcze wodę do pustych porów. Jeżeli zabraknie miejsca na ekspansję zamarzającej wody, to dochodzi do niszczenia betonu. Efektem niszczenia mrozowego są pęknięcia betonu. Gdy beton poddany jest działaniu mrozu i środków odladzających, to następuje łuszczenie powierzchni betonu. Łuszczenie wynika z niższej temperatury zamarzania roztworu wodnego soli niż wody. Niszczeniu ulegają głębsze warstwy betonu, ponieważ w warstwie przypowierzchniowej występuje duże stężenie roztworu soli [8, 20, 24].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Klasa ekspozycji XA wskazuje na zagrożenie oddziaływaniem agresywnych substancji chemicznych, które powodują **korozję chemiczną** betonu (np. korozję **siarczanową, ługowania, kwasową, amonową, zasadową, magnezową**) [4, 5, 9, 11, 15, 17, 23]. Klasa ekspozycji XA dzieli się na trzy podklasy agresji chemicznej (XA1, XA2, XA3), które dotyczą odpowiednio środowiska mało, średnio i silnie agresywnego. Środowiska te definiuje się przez charakterystykę chemiczną, obejmującą zawartość siarczanów, kwasów, dwutlenku węgla oraz jonów amonowych i magnezowych w przypadku wód gruntowych, a przez kwasowość i zawartość siarczanów w przypadku gruntów (PN-EN 206-1, tablica 2 [31]).

Korozję siarczanową, jedną z najgroźniejszych w skutkach (ze względu na gwałtowne niszczenie betonu), wywołują wodne roztwory zawierające siarczany. Korozja ta polega na reakcji jonów siarczanowych SO_4^{2-} (ze środowiska naturalnego /kwaśne deszcze, wody gruntowe/ lub przemysłowego) ze składnikami betonu (wodorotlenkiem wapniowym $Ca(OH)_2$ oraz uwodnionym glinianem trójwapniowym $3CaO{\cdot}Al_2O_3$). W pierwszej fazie wodorotlenek wapniowy $Ca(OH)_2$ przechodzi w siarczan wapniowy $CaSO_4$, który uwadnia się do siarczanu dwuwodnego (gipsu) $CaSO_4{\cdot}2H_2O$, a następnie powstaje monosiarczanoglinian $3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}CaSO_4{\cdot}12H_2O$ [$3CaO{\cdot}Al_2O_3 + CaSO_4{\cdot}2H_2O + 10H_2O \rightarrow 3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}CaSO_4{\cdot}12H_2O$] lub siarczanoglinian trójwapniowy (zwany ettringitem lub solą Candlota) $3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$ [$3CaO{\cdot}Al_2O_3 + 3CaSO_4{\cdot}2H_2O + 26H_2O \rightarrow 3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$], trudno rozpuszczalne związki chemiczne, krystalizujące z przyłączeniem wody i zwiększające przy tym znacznie swoją objętość (o 168% w przypadku igiełkowatych kryształów ettringitu). Początkowo powstające kryształy uszczelniają beton wskutek stopniowego wypełniania kapilar i porów betonu. Przy dalszym wzroście kryształów powstają bardzo duże naprężenia wewnętrzne, powodujące rysy i pęknięcia, a następnie zniszczenie betonu (il. 3) [4, 7, 9, 15, 20, 23].



Il. 3. Korozja siarczanowa [7, 23]

Ill. 3. Sulphate corrosion [7, 23]

Korozja ługowania polega na rozpuszczaniu i wymywaniu składników betonu, głównie wodorotlenku wapnia $Ca(OH)_2$, pod działaniem wód miękkich (występujących np. w potokach górskich) pozbawionych soli wapniowych (o małej twardości węglanowej). Korozja powoduje powierzchniowe łuszczenie i wykwity w postaci białych nalotów [4, 9].

Korozja kwasowa polega na reakcji wodnych roztworów mocnych kwasów mineralnych (kwasu solnego HCl, siarkowego H_2SO_4, azotowego HNO_3) lub organicznych (kwasu octowego) ze składnikami stwardniałego zaczynu cementowego – wodorotlenkiem wapniowym a także glinianami i krzemianami wapniowymi, tworząc łatwo rozpuszczalne sole, co powoduje zwiększenie porowatości betonu i obniżenie jego wytrzymałości [4, 20].

Korozja amonowa polega na wymianie jonów wapniowych Ca^{2+} na jony amonowe NH_4^-, powodując zwiększenie porowatości przez powstawanie rozpuszczalnych soli wapnio-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

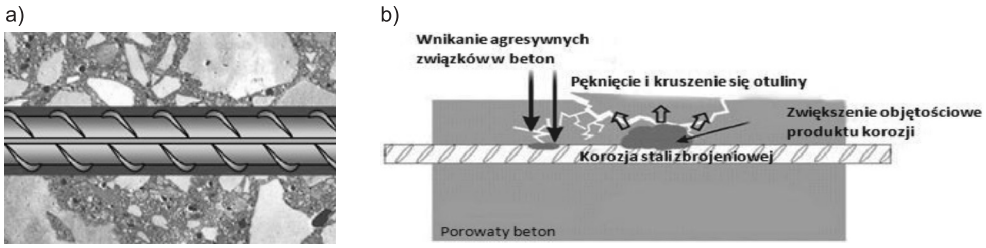
wych i wydzielający się amoniak [$Ca(OH)_2 + 2NH_4Cl \rightarrow CaCl_2 + 2NH_4OH \rightarrow CaCl_2 + 2H_2O + 2NH_3\uparrow$] [4, 9, 20].

Korozja zasadowa polega na reakcji silnie zasadowego środowiska zewnętrznego ze składnikami betonu, powodując stopniowy rozkład betonu przez tworzenie się rozpuszczalnych krzemianów i glinianów sodowych lub potasowych [$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 2KOH \rightarrow K_2O \cdot Al_2O_3 + Ca(OH)_2 + 4H_2O$] [4].

Korozja magnezowa polega na wymianie jonów wapniowych Ca^{2+} na jony magnezowe Mg^{2+} zawarte w wodzie morskiej lub wodach gruntowych. W wyniku reakcji powstaje $Mg(OH)_2$ (brucyt) (tworzący miękką, galaretowatą masę), słabo rozpuszczalny w wodzie i nie posiadający właściwości wiążących wobec zaczynu cementowego oraz łatwo rozpuszczalny chlorek wapniowy [$Ca(OH)_2 + MgCl_2 \rightarrow CaCl_2 + Mg(OH)_2$] [4, 9].

3. Korozja zbrojenia spowodowana utratą zdolności ochronnych przez beton

Oddziaływanie dwutlenku węgla powoduje stopniowe obniżanie pH (zobojętnianie) betonu (por. p. 2). W konstrukcjach żelbetowych spadek pH otuliny betonowej stanowi zagrożenie korozyjne nie tylko dla betonu (por. 2), ale również dla stali zbrojeniowej. Szczelna warstwa ochronna (tlenkowa) $FeO \cdot Fe_2O_3$, zwana warstwą pasywną występuje na powierzchni stali zbrojeniowej jedynie w alkalicznym środowisku betonu o pH wynoszącym 12–13 [4]. Stal pokryta tą warstwą jest w stanie pasywnym (il. 4a).



Il. 4. Korozja węglanowa (karbonatyzacja): a – warstwa pasywna na powierzchni stali zbrojeniowej, b – odpryski otuliny betonowej [5, 38]

Ill. 4. Carbonation: a – passive film (layer) on the surface of the reinforcing steel bar, b – deterioration (spalling) of the concrete cover [5, 38]

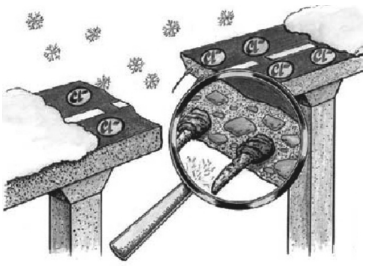
Gdy wartość pH betonu maleje poniżej 11,8, rozpoczyna się proces korozyjny stali zbrojeniowej, ponieważ wówczas następuje rozpuszczenie warstwy pasywnej, czyli depasywacja stali zbrojeniowej. PH betonu może obniżyć się nawet do wartości ok. 8,3 przy pełnej karbonatyzacji. Po rozpuszczeniu warstwy pasywnej, w obecności tlenu i wody (pochodzących ze środowiska) zachodzi elektrochemiczny proces korozyjny stali. W wyniku reakcji chemicznych powstają produkty korozji (początkowo $Fe(OH)_2$, a następnie po dalszym utlenianiu $Fe(OH)_3$), tworzące rdzę [$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$, $4\,Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_3$] [4].

O intensywności korozji zbrojenia decyduje stan zawilgocenia w warstwie otuliny i dyfuzja tlenu do zbrojenia. Produkty korozji zbrojenia zwiększając objętość, mogą powodować powstawanie rys w otulinie, które ułatwiają dostęp środowisk korozyjnych do zbrojenia. W postępującym procesie korozyjnym następują odpryski otuliny, odsłaniające stopniowo zbrojenie elementu (il. 4b) [5].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Normy PN-EN 206-1 [31] oraz EC 2 [35] definiują cztery klasy ekspozycji od XC1 do XC4, które uwzględniają czynnik wilgotności otuliny betonowej. Stan umiarkowanie wilgotny otuliny bądź przemienne cykle jej nawilżania i wysychania stanowią warunki najintensywniejszego przebiegu karbonatyzacji. W otulinie stale suchej lub stale zanurzonej w wodzie zagrożenie karbonatyzacją jest mniejsze (por. tab. 1).

W przypadku oddziaływania na beton chlorków brak warstwy pasywnej na powierzchni zbrojenia prowadzi do reakcji jonów chlorkowych Cl^- z żelazem, w wyniku której powstaje chlorek żelazowy $FeCl_2$. $FeCl_2$ w reakcji z wodą tworzy rdzę $Fe(OH)_2$, a wydzielający się kwas solny HCl powoduje powstawanie wżerów na powierzchni prętów zbrojeniowych) (il. 5) [$Fe + 2Cl^- \rightarrow FeCl_2 + 2e^-$, $FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + HCl$] [5, 11].



Il. 5. Korozja chlorkowa [7]

Ill. 5. Chloride corrosion [7]

Korozja żelbetu wywołana chlorkami jest niebezpieczna, ponieważ przez długi czas przebiega bezobjawowo. Poprzez miejscowe oddziaływanie korozyjne (wystąpienie wżerów) zniszczenie może mieć gwałtowny charakter. Wnikanie chlorków odbywa się bardzo szybko w porach wypełnionych wodą (ze względu na dyfuzję jonów chlorkowych), a ustaje w betonie wysuszonym (por. podklasy w klasach XD i XS).

Szybkość korozji stali zbrojeniowej jest największa w betonie okresowo zwilżanym, ponieważ takie warunki sprzyjają wnikaniu do wnętrza betonu CO_2 (beton suchy) i jonów chlorkowych Cl^- (beton zawilgocony).

4. Problematyka trwałości betonu w PN-EN 206-1, Eurokodach, poradniku „Eurokod 2 – Podręczny skrót dla projektantów konstrukcji żelbetowych" i *fib* – Model Code 2010

Przy projektowaniu konstrukcji betonowych oprócz ustalenia obciążeń mechanicznych (koniecznych do projektowania konstrukcyjnego) należy także określić przyszły wpływ otoczenia, czyli klasy ekspozycji.

Aby uniknąć uszkodzeń spowodowanych przez wilgoć, mróz, dwutlenek węgla, sól stosowaną do odladzania oraz inne agresywne substancje chemiczne, czyli aby zapewnić projektowy okres użytkowania konstrukcji, należy „uwzględnić wymagania dotyczące trwałości rozpatrując koncepcję konstrukcji, dobór materiałów, szczegóły konstrukcji, wykonanie, kontrolę jakości, przeglądy, sprawdzenia, środki specjalne (np. zastosowanie stali nierdzewnej, powłok, ochrony katodowej)" (EC2, p. 4.3 [35]).

W dokumentach normatywnych ustalono wymagania (materiałowe i technologiczne) dla pracy konstrukcji nie krótszej niż 50 lat. Zgodnie z Eurokodem (PN-EN 1990) (p. 2.3)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[34] przyjmuje się 50 lat jako projektowy okres użytkowania dla zwykłych obiektów budowlanych, a 100 lat dla budynków monumentalnych, mostów i innych konstrukcji inżynierskich [16]. Projektowy okres użytkowania jest definiowany jako „przyjęty w projekcie przedział czasu, w którym konstrukcja lub jej część ma być użytkowana zgodnie z zamierzonym przeznaczeniem i przewidywanym utrzymaniem, bez potrzeby większych napraw" (Eurokod/PN-EN 1990/, p. 1.5.2.8 [34]).

Podane w normach betonowych PN-EN 206-1 [31] oraz PN-B-06265 [33] wymagania trwałościowe odnoszą się do okresu użytkowania 50 lat. Zalecenia zawarte w normie żelbetowej EC2 [34] dotyczą okresu użytkowania 50 lat w przypadku wymagań, które przyjęto za normą PN-EN 206-1 (odnośnie jakości betonu w konstrukcji, czyli maksymalnego współczynnika woda-cement w/c, minimalnej zawartości cementu oraz minimalnej klasy betonu/EC2, p. 4.1, Zał. E [35]/), natomiast obejmują okres użytkowania 50 i 100 lat dla uwarunkowań odnośnie grubości otuliny betonowej. Wymagania zestawione w podręczniku „Eurokod 2. Podręczny skrót dla projektantów konstrukcji żelbetowych" [2] (określanego w artykule jako „Poradnik") odnoszą się do okresu użytkowania 50 i 100 lat (tab. 1).

Metodą zapewnienia trwałości betonu, przyjętą w dokumentach normatywnych jest ochrona materiałowo-strukturalna, polegająca na doborze (jakościowym i ilościowym) składników, a także na kształtowaniu mikrostruktury betonu. W przypadku środowiska średnio (XA2) i bardzo silnie (XA3) agresywnego konieczna jest również ochrona powierzchniowa betonu (impregnacja betonu, nakładanie powłok), mająca na celu ograniczenie (XA2) lub odcięcie (XA3) betonu od dostępu czynników korozyjnych [5, 17].

Wymagania zawarte w PN-EN 206-1 [31] (dla klas ekspozycji X0, XC, XD, XS, XF, XA) oraz PN-B-06265 [33] (dla klasy ekspozycji XM) dotyczą składu i wybranych właściwości betonu. Dla wszystkich klas ekspozycji (7 klas, 21 podklas) wyszczególniono wartości graniczne dla składu (maksymalny wskaźnik wodno-cementowy w/c, minimalną zawartość cementu) oraz minimalną klasę wytrzymałości betonu (wartości dotyczą „zastosowania cementu CEM I oraz kruszywa o maksymalnym wymiarze ziaren w zakresie od 20 do 32 mm" /PN-EN 206-1, Zał. F [31]/). Z ograniczeń wartości wskaźnika w/c i zawartości cementu wynika ilość zaczynu w betonie, czyli zawartość składnika decydującego o porowatości betonu, a przez to o dostępności środowiska agresywnego. Dodatkowe uwarunkowania materiałowe podano w przypadku wybranych klas ekspozycji (XF, XA, XM). W przypadku zagrożenia korozją mrozową (klasa XF) specjalne zalecenia odnoszą się do napowietrzenia mieszanki betonowej (minimalnej zawartości powietrza) oraz jakości kruszywa („o odpowiedniej odporności na zamrażanie") (napowietrzenie mieszanki to zwiększenie ilości porów, np. przez zastosowanie domieszki napowietrzającej; wytworzona przez domieszkę duża ilość bardzo drobnych pęcherzyków powietrza /o średnicy od 20 do 250 μm, rozmieszczonych w odległości 150–250 μm/ przejmuje nadmiar wody w sieci porów kapilarnych i nie dopuszcza do zniszczenia betonu [8, 20]). W przypadku oddziaływania środowiska chemicznie agresywnego (klasy XA2, XA3) wymagania dotyczą rodzaju cementów (siarczanoodporne HSR), a dla zagrożenia ścieraniem (klasa XM) rodzaju kruszywa (tab. 1) [25, 27, 28].

Im większe zagrożenie korozyjne, tym zalecana jest mniejsza wartość wskaźnika w/c (zapewniająca mniejszą porowatość kapilarną, czyli bardziej szczelny beton), większa wartość „minimalnej zawartości cementu" (decydująca o większym udziale szkieletu w kapilarno-porowatej strukturze betonu) oraz wyższa klasa betonu (oznaczająca małą porowatość całkowitą betonu, uzyskaną przez dobór składu) [3, 7, 12, 20, 21, 27].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Minimalne klasy wytrzymałości betonu podane dla klas środowiskowych (od braku zagrożeń do najbardziej agresywnych oddziaływań) obejmują zakres od C12/15 (dla X0) do C35/45 (tab. 1). Klasą wytrzymałości betonu wyszczególnioną w największej liczbie klas ekspozycji (dwunastu) jest C30/37. Najwyższa klasa C35/45 jest wymagana dla warunków środowiskowych najbardziej agresywnych, czyli w przypadku klas ekspozycji XD3 (działanie chlorków niepochodzących z wody morskiej w środowisku cyklicznie mokrym i suchym, zagrażające elementom mostów, nawierzchniom dróg, parkingów), XS2, XS3 (działanie chlorków, na które mogą być narażone elementy budowli morskich stale zanurzone w wodzie lub będące w strefie pływów, rozbryzgów i aerozoli), XA3 (działanie środowiska chemicznego silnie agresywnego, występujące np. w obiektach oczyszczalni ścieków), XM3 (ekstremalnie silne zagrożenie ścieraniem, dotyczące np. filarów mostów, powierzchni przelewów, ścian spustów w obiektach hydrotechnicznych) (tab. 1).

Maksymalny wskaźnik wodno-cementowy w/c wynosi od 0,65 (dla XC1) do 0,45 (dla klas środowiskowych XD3, XS2, XS3, XF4, XA3, XM3), a minimalna zawartość cementu od 260 kg/m^3 (dla XC1) do 360 kg/m^3 (dla XA3) (tab. 1).

Norma betonowa PN-EN 206-1 [31] wymaga spełnienia nie tylko uwarunkowań dotyczących wartości granicznych (wskaźnika w/c, zawartości cementu, klasy betonu) (czyli uwarunkowań dotyczących receptury betonu), ale także zaleceń dla betonu w konstrukcji odnośnie pielęgnacji betonu oraz grubości otuliny prętów zbrojeniowych („należy uznać, że beton w konstrukcji spełnia wymagania trwałości /dla przewidywanego zastosowania w danym środowisku/, pod warunkiem, że beton został prawidłowo ułożony, zagęszczony i pielęgnowany /np. zgodnie z PN-EN 13670/, zbrojenie ma minimalną otulinę betonu, zgodnie z odpowiednią normą dotyczącą projektowania dla danych warunków środowiska /np. PN-EN 1992-1-1 (EC2) [35]/, prawidłowo dobrano klasę ekspozycji, stosuje się przewidzianą konserwację konstrukcji") (PN-EN 206-1, p. 5.3 [31]).

W normie żelbetowej EC2 [35] oprócz wymagań dla składu betonu (takich, jak w normie betonowej PN-EN 206-1 [31]) podano zalecenia odnośnie minimalnej grubości otuliny zbrojenia dla wybranych klas ekspozycji X0, XC, XD i XS (dla zagrożenia korozją spowodowaną CO_2 i chlorkami, czyli czynnikami szczególnie agresywnymi dla konstrukcji betonowych zbrojonych) (EC2, p. 4.4.1 [35]). Wartości minimalnej grubości otuliny ze względu na trwałość $c_{min,dur}$ przedstawiono w tab. 1. Minimalna grubość otuliny ze względu na trwałość nie jest minimalną grubością otuliny przyjmowaną w projekcie. Grubość otuliny zbrojenia (grubość „nominalną") określa się na podstawie grubości otuliny ze względu na trwałość ($c_{min,\ dur}$) oraz grubości otuliny ze względu na przyczepność betonu do zbrojenia, wybierając wyższą wartość, a także uwzględniając odchyłkę wymiarową otuliny ze względów wykonawczych (por. tab. 1 – oznaczenia) [16, 35]. Minimalna grubość otuliny zbrojenia określona na podstawie wymagań trwałościowych i odchyłki wynosi od około 20 mm (dla X0) do 55 mm (dla XD3, XS3).

Podane w normach PN-EN 206-1 [31] (betonowej) i EC2 [35] (żelbetowej) wymagania trwałościowe dla warunków środowiskowych szczególnie korozyjnych dla żelbetu (dla klas ekspozycji XC, XD, XS – oddziaływanie CO_2 i chlorków) są mniej szczegółowe i często mniej rygorystyczne od przedstawionych w „Poradniku" („Eurokod 2. Podręczny skrót dla projektantów konstrukcji żelbetowych" [2]) (podręczniku wydanym w 2009 roku) (zalecenia podane w „Poradniku" dotyczą betonu zwykłego na kruszywie o maksymalnych ziarnach 20 mm). Dla klasy ekspozycji X0 wytyczne normowe podają minimalną klasę wytrzymałości betonu (C12/15) oraz minimalną grubość otuliny „ze względu na trwałość" (10 mm),

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

natomiast wytyczne poradnikowe „nie zalecają zakładania tej klasy ekspozycji w konstrukcjach żelbetowych".

Zawarte w „Poradniku" zalecenia materiałowe dla klas XC, XD, XS dotyczą nie tylko wskaźnika w/c, zawartości cementu, klasy betonu (jak w dokumentach normowych), ale również rodzaju cementu. Rodzaj cementu jest parametrem materiałowym decydującym zarówno o podatności korozyjnej betonu (zastosowanie dodatków mineralnych /żużla wielkopiecowego, popiołu lotnego/ powoduje zmniejszenie ilości wodorotlenku wapniowego w zaczynie cementowym) (por. p. 2), jak również o wytrzymałości betonu na ściskanie (wytrzymałość betonu z cementu portlandzkiego z dodatkami żużla lub popiołu lotnego jest mniejsza niż betonu z cementu portlandzkiego CEM I) (por. tab. 1) [7, 12, 20].

Ponadto w wymaganiach podanych w „Poradniku" zawartość cementu (mająca istotny wpływ na porowatość zaczynu cementowego) jest większa niż w zaleceniach normowych. Minimalna zawartość cementu wynosi: dla klas XC3, XC4 – 280 kg/m^3 (normy) i 300 kg/m^3 („Poradnik") (w/c = 0,55), dla klas XD1, XD2 – 300 kg/m^3 (normy) i 320 kg/m^3 („Poradnik") (w/c = 0,55), dla klasy XS1 – 300 kg/m^3 (normy) i 340 kg/m^3 („Poradnik") (w/c = 0,50), dla klasy XS2 – 320 kg/m^3 (normy) i około 340 kg/m^3 („Poradnik") (w/c = 0,45), dla klasy XD3 – 320 kg/m^3 (normy) i 360 kg/m^3 („Poradnik") (w/c = 0,45), dla klasy XS3 – 340 kg/m^3 (normy) i 360 kg/m^3 („Poradnik") (w/c = 0,45) (tab. 1). Największa różnica (40 kg/m^3) między zaleceniami normowymi a poradnikowymi występuje w przypadku klas XD3 (działanie chlorków w środowisku cyklicznie suchym i mokrym) i XS1 (działanie chlorków z wody morskiej zawartych w powietrzu zagrażające konstrukcjom zlokalizowanym na wybrzeżu).

Wymagania materiałowe w „Poradniku" są następujące: maksymalny wskaźnik wodno-cementowy w/c wynosi od 0,70 dla XC1 (0,65 w normach) do 0,35 dla XD3, XS1, XS3 (0,45 w normach), minimalna zawartość cementu od 240 kg/m^3 dla XC1, XC2 (260 kg/m^3 w normach) do 380 kg/m^3 dla XS3 (360 kg/m^3 w normach), a minimalna klasa wytrzymałości od C20/25 dla XC1, XC2 (C12/15 dla X0 i C20/25 dla XC1 w normach) do C50/60 dla XS1 i C45/55 dla XD3, XS3 (C35/45 w normach) (tab. 1).

W „Poradniku" dla większości klas ekspozycji przedstawiono kilka wariantów doboru składu, uwzględniając także zależność grubości otuliny od składu betonu (większa grubość otuliny jest konieczna w przypadku małej zawartości cementu i/lub wysokiego wskaźnika wodno-cementowego /ze względu na możliwość większego udziału porów w strukturze betonu/) (tab. 1). Zalecenia poradnikowe dotyczą „betonu zwykłego na kruszywie o maksymalnych ziarnach 20 mm", a zalecenia zawarte w PN-EN 206-1 [32] „betonu z cementu CEM I i kruszywa o maksymalnym wymiarze ziaren w zakresie od 20 do 32 mm").

Wyznaczona normowo lub poradnikowo klasa wytrzymałości ze względu na trwałość betonu (na okres użytkowania) jest czasami większa niż klasa wytrzymałości wynikająca z obliczeń konstrukcyjnych. Zatem w pewnych przypadkach o składzie betonu decydują nie wymagania konstrukcyjne, ale wymagania trwałościowe.

W najnowszym dokumencie normatywnym – „normie wzorcowej" *fib* – Model Code 2010 (MC2010) [30], opracowanej przez Międzynarodową Federację Betonu Konstrukcyjnego (fib – federation internationale du beton), wydanej w 2010 roku w dwóch tomach – Biuletynie 55 fib (tom 1) i Biuletynie 56 fib (tom 2) [30], problematykę trwałości betonu omówiono szerzej niż w PN-EN 206-1 [31], EC2 [35], „Poradniku" [2], przedstawiając jednak niektóre zagadnienia ogólnie (ale z zapowiedzią szczegółowego opracowania w najbliższym czasie, np. modeli zachowania się betonu konstrukcyjnego w różnych środowiskach korozyjnych) [1, 19, 26].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Jeżeli trwałość betonu konstrukcyjnego jest zapewniona przez uwzględnienie podczas projektowania wymagań (wynikających z klas ekspozycji) (stabelaryzowanych) odnośnie składu mieszanki betonowej, napowietrzenia, grubości otuliny zbrojenia, itp., czyli wymagań podanych np. w PN-EN 206-1, EC2, „Poradniku", to ten sposób ochrony przed agresją środowiska określany jest jako „podejście uznane za wystarczające" (*deemed-to-satisfy approach*).

Natomiast korzystanie podczas projektowania ze wskazań (zaleceń) dotyczących np. zabiegów technologicznych jest sposobem zapewnienia trwałości nazwanym w normie MC2010 [30] unikanie zniszczenia (*avoidance-of-deterioration approach*). Przykładowe wskazania materiałowe i technologiczne, podane w MC2010, są następujące:

– oddzielenie betonu (konstrukcji) od czynników reaktywnych (np. przez utrzymanie stopnia zawilgocenia betonu poniżej poziomu krytycznego, przez zastosowanie powłok ochronnych),
– zastosowanie niereaktywnych materiałów (np. stali nierdzewnej, kruszywa niereaktywnego),
– przeciwdziałanie szkodliwym reakcjom (np. za pomocą metod elektrochemicznych) (MC2010, Biuletyn 55 fib, p. 4.8 [30]).

W MC 2010 [30] przedstawiono jeszcze dwa inne podejścia (obliczeniowe) do problemu bezpieczeństwa betonu konstrukcyjnego w różnych warunkach oddziaływania środowiska:

– podejście probabilistyczne (*probabilistic safety format*) (sprawdzenie prawdopodobieństwa wystąpienia stanów granicznych),
– podejście półprobabilistyczne (*partial safety factor format*) (wykorzystujące częściowe współczynniki bezpieczeństwa) [1, 19, 26].

Brak w normie MC2010 [19, 26, 30] modeli (ciągle jeszcze opracowywanych) zachowania się materiału w określonym środowisku agresywnym nie pozwala na zastosowanie w projektowaniu na trwałość podejścia probabilistycznego i półprobabilistycznego, czyli na wykonanie obliczeń rozważając stany graniczne (np. w przypadku karbonatyzacji 4 stany graniczne: depasywacja zbrojenia spowodowana przez karbonatyzację, zarysowanie wywołane korozją zbrojenia, odpryskiwanie otuliny betonowej wskutek korozji zbrojenia, zniszczenie wywołane ubytkiem przekroju poprzecznego zbrojenia /MC2010, Biuletyn 56 fib, p. 7.8.2 [30]/).

Tabela 1

Klasy ekspozycji oraz wartości graniczne dotyczące składu i właściwości betonu

KLASY EKSPOZYCJI	
NORMY: PN-EN 206-1 (p. 4.1) [30, 31], Eurokod 2, cz. 1-1 (PN-EN 1992-1-1) (EC2) (p. 4.2) [34], MC2010 (p. 4.7.2) [29], PN-B-06265 (klasa ekspozycji XM) [32]	
PORADNIK: Eurokod 2. Podręczny skrót dla projektantów konstrukcji żelbetowych [2]	
Ozn. klasy eksp.	Opis środowiska
	Przykłady występowania klas ekspozycji
WARTOŚCI GRANICZNE DOTYCZĄCE SKŁADU I WŁAŚCIWOŚCI BETONU	
NORMY: PN-EN 206-1 (p. 5.3, Zał. F) [30], Eurokod 2, cz. 1-1 (PN-EN 1992-1-1) (EC2) (p. 4.1, 4.4.1, Zał. E) [34], PN-B-06265 (klasa ekspozycji XM) [32]	

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

cd tab. 1

PORADNIK: Eurokod 2. Podręczny skrót dla projektantów konstrukcji żelbetowych [2]							
Ozn. klasy eksp.	Rodzaj cementu	Min klasa wytrz. betonu	Max współcz. wodno-cement.	Min zawart. cementu	Min grub. otuliny ze wzgl. na trwałość	Rodz. krusz.	Min zaw. pow.
X0 – Brak zagrożenia agresją środowiska lub zagrożenia korozją							
X0	Wszystkie środowiska z wyjątkiem klasy ekspozycji XF, XA, XM – dotyczy betonów niezbrojonych Środowisko bardzo suche – dotyczy betonów zbrojonych						
	Beton wewnątrz budynków o bardzo niskiej wilgotności powietrza						
NORMY (projektowy okres użytkowania: 50 lat) PORADNIK (projektowy okres użytkowania: 50 lat, 100 lat – zalecenia dla 50 lat i 100 lat są takie same)							
	cement	min klasa betonu	$(w/c)_{max}$	min zawart. cementu	min grub. otuliny ze względu na trw. ($c_{min,dur}$)	krusz.	min zaw. pow.
NORMY							
X0	–	C12/15	–	–	10 mm	–	–
PORADNIK							
X0	każdy	–	–	–	–	–	–
	Nie zaleca się zakładania tej klasy ekspozycji w konstrukcjach żelbetowych						
XC – Korozja spowodowana karbonatyzacją							
XC1	Środowisko suche lub stale mokre						
	Beton wewnątrz budynków o niskiej wilgotności powietrza Beton stale zanurzony w wodzie						
XC2	Środowisko mokre, sporadycznie suche						
	Powierzchnie betonu narażone na długotrwały kontakt z wodą (np. fundamenty)						
XC3	Środowisko umiarkowanie wilgotne						
	Beton wewnątrz budynków o umiarkowanej wilgotności powietrza Beton na zewnątrz osłonięty przed deszczem						
XC4	Środowisko cyklicznie mokre i suche						
	Powierzchnie betonu narażone na kontakt z wodą, ale nie jak w klasie XC2						
NORMY (projektowy okres użytkowania: 50 lat) PORADNIK (projektowy okres użytkowania: 50 lat, 100 lat – zalecenia dla 50 lat i 100 lat są takie same, gdy nie wyszczególniono różnic)							
	cement	min klasa betonu	$(w/c)_{max}$	min zawart. cementu	min grub. otuliny ze względu na trw. ($c_{min,dur}$)	krusz.	min zaw. pow.
NORMY							
XC1	–	C20/25	0,65	260 kg	15 mm	–	–
PORADNIK							
XC1	każdy	C20/25	0,70	240 kg	15 mm	–	–
NORMY							
XC2	–	C25/30	0,60	280 kg	25 mm	–	–

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

cd. tab. 1

PORADNIK							
XC2	każdy	C20/25	0,70	240 kg	25 mm	–	–
NORMY							
XC3	–	C30/37	0,55	280 kg	25 mm	–	–
XC4		C30/37	0,50	300 kg	30 mm		
PORADNIK							
XC3 XC4	każdy, za wyjątk. IVB	C40/50	0,45	340 kg	20 mm	–	–
		C30/37 (50 lat)	0,55 (50 lat)	300 kg (50 lat)	25 mm		
		C35/45 (100 lat)	0,50 (100 lat)	320 kg (100 lat)			
		C30/37 (50 lat)	0,60 (50 lat)	280 kg (50 lat)	30 mm		
		C35/45 (100 lat)	0,55 (100 lat)	300 kg (100 lat)			
		C25/30 (50 lat)	0,65 (50 lat)	260 kg (50 lat)	35 mm		
		C30/37 (100 lat)	0,60 (100 lat)	280 kg (100 lat)			
XD – Korozja spowodowana chlorkami niepochodzącymi z wody morskiej							
XD1	Środowisko umiarkowanie wilgotne						
	Powierzchnie betonu narażone na działanie chlorków z powietrza						
XD2	Środowisko mokre, sporadycznie suche						
	Baseny Beton narażony na działanie wody przemysłowej zawierającej chlorki						
XD3	Środowisko cyklicznie mokre i suche						
	Elementy mostów narażone na działanie rozpylonych cieczy zawierających chlorki Nawierzchnie dróg Płyty parkingów						
NORMY, PORADNIK (projektowy okres użytkowania: 50 lat)							
	cement	min klasa betonu	$(w/c)_{max}$	min zawart. cementu	min grub. otuliny ze względu na trw. ($c_{min,dur}$)	krusz.	min zaw. pow.
NORMY							
XD1	–	C30/37	0,55	300 kg	35 mm	–	–
PORADNIK							
XD1	każdy	C40/50	0,45	360 kg	25 mm	–	–
		C35/45	0,55	320 kg	30 mm		
		C30/37	0,60	300 kg	35 mm		
NORMY							
XD2	–	C30/37	0,55	300 kg	40 mm	–	–

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

cd. tab. 1

PORADNIK							
XD2	CEM I, IIA, IIB-S, HSR	C40/50	0,40	380 kg	30 mm	–	–
	IIB-V, IIIA	C35/45					
	IIIB, IVB						
	CEM I, IIA, IIB-S, HSR		0,50	340 kg	35 mm		
	IIB-V, IIIA	C30/37					
	IIIB, IVB	C25/30					
	CEM I, IIA IIB-S, HSR	C30/37	0,55	320 kg	40 mm		
	IIB-V, IIIA	C25/30					
	IIIB, IVB	C20/25					
NORMY							
XD3	–	C35/45	0,45	320 kg	45 mm	–	–
PORADNIK							
XD3	CEM I, IIA, IIB-S, HSR	C45/55	0,35	380 kg	40 mm	–	–
		C40/50	0,40		45 mm		
	IIB-V, IIIA	C35/45			40 mm		
	IIIB, IVB						
	CEM I, IIA, IIB-S, HSR	C35/45	0,45	360 kg	50 mm		
	IIB-V, IIIA				45 mm		
	IIIB, IVB	C30/37					
	IIB-V, IIIA		0,50	340 kg	50 mm		
	IIIB, IVB	C25/30					
XS – Korozja spowodowana chlorkami pochodzącymi z wody morskiej							
XS1	Narażenie na działanie soli zawartych w powietrzu, ale nie na bezpośredni kontakt z wodą morską						
	Konstrukcje zlokalizowane na wybrzeżu lub w jego pobliżu						
XS2	Stałe zanurzenie w wodzie						
	Elementy budowli morskich						
XS3	Strefy pływów, rozbryzgów i aerozoli (pyłu wodnego)						
	Elementy budowli morskich						
NORMY, PORADNIK (projektowy okres użytkowania: 50 lat)							
	cement	min klasa betonu	$(w/c)_{max}$	min zawart. cementu	min grub. otuliny ze względu na trw. ($c_{min,dur}$)	krusz.	min zaw. pow.
NORMY							
XS1	–	C30/37	0,50	300 kg	35 mm	–	–

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

cd. tab. 1

PORADNIK							
XS1	CEM I, IIA, IIB-S, HSR	C50/60	0,35	380 kg	30 mm	–	–
	IIB-V, IIIA	C45/55					
	IIIB, IVB	C35/45	0,40				
	CEM I, IIA, IIB-S, HSR	C40/50	0,45	360 kg	35 mm		
	IIB-V, IIIA	C35/45					
			0,50	340 kg	40 mm		
	CEM I, IIA, IIB-S, HSR						
	IIIB, IVB	C30/37			35 mm		
		C25/30	0,55	320 kg	40 mm		
NORMY							
XS2	–	C35/45	0,45	320 kg	40 mm	–	–
PORADNIK							
XS2	CEM I, IIA, IIB-S, HSR	C40/50	0,40	380 kg	30 mm	–	–
	IIB-V, IIIA	C35/45					
	IIIB, IVB						
	CEM I, IIA, IIB-S, HSR		0,50	340 kg	35 mm		
	IIB-V, IIIA	C30/37					
	IIIB, IVB	C25/30					
	CEM I, IIA, IIB-S, HSR	C30/37	0,55	320 kg	45 mm		
	IIB-V, IIIA	C25/30					
	IIIB, IVB	C20/25					
NORMY							
XS3	–	C35/45	0,45	340 kg	45 mm	–	–
PORADNIK							
XS3	CEM I, IIA, IIB-S, HSR	C45/55	0,35	380 kg	45 mm	–	–
		C40/50	0,40		50 mm		
	IIIB, IVB	C35/45			40 mm		
	IIB-V, IIIA						
			0,45	360 kg	45 mm		
	IIIB, IVB	C30/37					
	IIB-V, IIIA		0,50	340 kg	50 mm		
	IIIB, IVB	C25/30					
XF – Agresywne oddziaływanie zamrażania/rozmrażania							
XF1	Umiarkowane nasycenie wodą bez środków odladzających						
	Pionowe powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie						
XF2	Umiarkowane nasycenie wodą ze środkami odladzającymi						
	Pionowe powierzchnie betonowe konstrukcji drogowych narażonych na zamarzanie oraz działanie z powierza środków odladzających						

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

cd. tab. 1

XF3	Silne nasycenie wodą bez środków odladzających						
	Poziome powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie						
XF4	Silne nasycenie wodą ze środkami odladzającymi						
	Płyty dróg i mostów narażone na działanie środków odladzających Powierzchnie betonowe narażone bezpośrednio na opryskiwanie środkami odladzającymi i na zamarzanie Strefy narażone na ochlapywanie i zamarzanie w konstrukcjach morskich						
NORMY (projektowy okres użytkowania: 50 lat)							
	cement	min klasa betonu	$(w/c)_{max}$	min zawart. cementu	min grub. otuliny ze względu na trw. ($c_{min,dur}$)	krusz.	min zaw. pow.
NORMY							
XF1	–	C30/37	0,55	300 kg	–		–
XF2		C25/30					min 4 %
XF3		C30/37	0,50	320 kg			
XF4			0,45	340 kg			
Kruszywo: o odpowiedniej odporności na zamrażanie/rozmrażanie (zgodnie z PN-EN 12620)							
XA – Agresja chemiczna							
Kwalifikacja do odpowiedniej klasy ekspozycji (XA1 do XA3) środowiska agresywnego chemicznie - na podstawie wartości granicznych podanych w Tablicy 2 PN-EN 206-1							
Środowisko: naturalne grunty i woda gruntowa							
XA1	Środowisko chemiczne mało agresywne zgodnie z Tablicą 2 PN-EN 206-1						
	Fundamenty narażone na wpływ wód gruntowych Podpory mostowe w nurtach rzek [28]						
XA2	Środowisko chemiczne średnio agresywne zgodnie z Tablicą 2 PN-EN 206-1						
	Rury i studnie kanalizacyjne Nawierzchnie stacji paliw [28]						
XA3	Środowisko chemiczne silnie agresywne zgodnie z Tablicą 2 PN-EN 206-1						
	Kolektory sieci kanalizacyjnej Osadniki w oczyszczalniach ścieków [28]						
NORMY (projektowy okres użytkowania: 50 lat)							
	cement	min klasa betonu	$(w/c)_{max}$	min zawart. cementu	min grub. otuliny ze względu na trw. ($c_{min,dur}$)	krusz.	min zaw. pow.
NORMY							
XA1	–	C30/37	0,55	300 kg	–	–	–
XA2	siarczano-odporne HSR		0,50	320 kg			
XA3		C35/45	0,45	360 kg			
XM – Korozja spowodowana ścieraniem							
XM1	Umiarkowane zagrożenie ścieraniem						
	Posadzki, nawierzchnie eksploatowane przez pojazdy o ogumieniu pneumatycznym						

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

cd. tab. 1

XM2	Silne zagrożenie ścieraniem						
	Posadzki i nawierzchnie eksploatowane przez pojazdy o ogumieniu pełnym oraz wózki podnośnikowe na ogumieniu elastomerowym lub rolkach stalowych						
XM3	Ekstremalnie silne zagrożenie ścieraniem						
	Posadzki i nawierzchnie często najeżdżane przez pojazdy gąsienicowe Filary mostów Powierzchnie przelewów, ściany spustów i sztolni hydrotechnicznych, niecki wypadowe						
NORMY (projektowy okres użytkowania: 50 lat)							
	cement	min klasa betonu	$(w/c)_{max}$	min zawart. cementu	min grub. otuliny ze względu na trw. ($c_{min,dur}$)	krusz.	min zaw. pow.
NORMY							
XM1	–	C30/37	0,55	300 kg	–	–	–
XM2							
	XM2: obróbka powierzchni betonu, np. przez wygładzanie i próżnowanie betonu						
XM3	–	C35/45	0,45	320 kg	–		–
	Kruszywo: o wysokiej odporności na ścieranie						
Mieszanka kruszyw – możliwie gruboziarnista Frakcje grubsze kruszywa – ze skał magmowych czy metamorficznych lub tworzyw sztucznych o dużej odporności na ścieranie Kruszywa o uziarnieniu do 4 mm – składające się głównie z kwarcu lub materiałów co najmniej tej samej twardości Ziarna kruszywa – o umiarkowanie chropowatej powierzchni oraz posiadające wypukłą formę Uszlachetnianie powierzchni betonu – materiałami odpornymi na ścieranie							
Oznaczenia							
CEM I – cement portlandzki, IIA – cement portlandzki z dodatkiem 6-20% popiołów lotnych, mielonego żużla wielkopiecowego lub wapienia, IIB – cement portlandzki z dodatkiem 21-35% popiołów lotnych lub mielonego żużla wielkopiecowego, IIIA – cement hutniczy, zawierający 35-65% mielonego żużla wielkopiecowego, IIIB – cement hutniczy, zawierający 66-80% mielonego żużla wielkopiecowego, IVB – cement pucolanowy, zawierający 36-65% popiołów lotnych, HSR – cement portlandzki o wysokiej odporności na siarczany, *S* – dodatek mielonego żużla wielkopiecowego, *V* – dodatek popiołów lotnych grubość otuliny zbrojenia = nominalna grubość otuliny (c_{nom}) (wg EC2 [35]) $c_{nom} = c_{min} + \Delta c$, c_{min} = max ($c_{min,dur}$, $c_{min,b}$, 10 mm), $c_{min,dur}$ – minimalna grubość otuliny ze względu na trwałość stali zbrojeniowej, $c_{min,dur}$ dla projektowanego *okresu użytkowania 100 lat* oraz dla wyższych klas betonu niż zalecane (jako min klasy) – wg EC2, Tab. 4.3N, 4.4N [16, 35], $c_{min,b}$ – minimalna grubość otuliny ze względu na przyczepność betonu do zbrojenia ($c_{min,b} \geq Ø$, Ø – średnica pręta zbrojeniowego, $c_{min,b} \geq Ø + 5$ mm, gdy kruszywo o max średnicy ≥ 32 mm), Δc = max 10 mm, Δc – dodatek grubości otuliny z uwagi na odchyłki podczas wykonawstwa (Δc = 10 mm ogólnie, Δc – od 5 do 10 mm, gdy działa system kontroli jakości i sprawdzana jest otulina, Δc – od 0 do 10 mm, gdy odrzucane są elementy nieodpowiadające wymiarom na podstawie dokładnych pomiarów otuliny (np. w prefabrykacji))							

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

5. Wnioski

W artykule przedstawiono wymagania ze względu na trwałość dotyczące składu i właściwości betonu (wskaźnika wodno-cementowego, rodzaju i ilości cementu, wytrzymałości na ściskanie) oraz grubości otuliny betonowej w zależności od klas ekspozycji, zawarte w dokumentach normalizacyjnych (PN-EN 206-1 [31], PN-B-06265 [33], PN-EN 1990 [34], PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2 [35]) oraz w poradniku „Eurokod 2 – Podręczny skrót dla projektantów konstrukcji żelbetowych" [2]. Informacje te poszerzono o charakterystykę warunków środowiskowych agresywnych oraz opisy korozji wywoływanych czynnikami chemicznymi i działaniem mrozu.

Zalecenia zawarte w normach odnoszą się jedynie do betonu zwykłego. Normy nie zawierają wytycznych materiałowych i technologicznych dla betonów nowej generacji, np. betonów samozagęszczalnych (SCC – *Self Compacted Concrete*) (norma PN-EN 206-9 dotycząca betonu samozagęszczalnego odsyła jedynie do zaleceń w normie PN-EN 206-1), betonu z dodatkiem włókien, itd.

Wyniki prac badawczych prowadzonych w sposób ciągły w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie oraz obserwacje w praktyce mechanizmów niszczenia korozyjnego pozwalają na weryfikację skuteczności nowych materiałów i technologii w poprawie odporności korozyjnej betonu, będącego również otuliną stali zbrojeniowej.

Ale zdobywanie nowych doświadczeń badawczych umożliwia również udoskonalanie metod projektowania betonu „na trwałość" (projektowania równie ważnego współcześnie, jak projektowanie konstrukcyjne i projektowanie środowiskowe, obejmujące ocenę wpływu konstrukcji na środowisko [1]). Takim udoskonaleniem analizy trwałościowej będzie podanie wymagań odnośnie właściwości betonu (normy dostarczają informacji jedynie na temat metod badawczych /np. PN-EN 12390-8 Badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem, PKN-CEN/TS 12390-9 Badanie odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie, CEN/TR 15177 Badanie mrozoodporności betonu, ale brak kryteriów oceny wyników badań). Zatem niezbędne jest pilne opracowanie odpowiednich krajowych arkuszy normalizacyjnych. Oczekiwane są również modele obliczeniowe w nowym dokumencie normatywnym (nowej generacji Eurokodzie 2, przewidywanym na lata 2015-2016 [1], a może wcześniej, w nowej normie wzorcowej).

Literatura

[1] Ajdukiewicz A., *Aspekty trwałości i wpływu na środowisko w projektowaniu konstrukcji betonowych*, Przegląd Budowlany, 2/2011, 20-29.

[2] Ajdukiewicz A., (red.), *Eurokod 2 – Podręczny skrót dla projektantów konstrukcji żelbetowych*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2009.

[3] Brandt A.M., *Cement based composites: materials, mechanical properties and performance*, Taylor&Francis, 2009.

[4] Czarnecki L., Broniewski T., Henning O., *Chemia w budownictwie*, Arkady, Warszawa 1994.

[5] Czarnecki L., Emmons P.H., *Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych*, Polski Cement, Kraków 2002.

[6] Czarnecki L., Wojciechowski P., *Metody oceny przebiegu karbonatyzacji betonu*, II Sympozjum Naukowo-Techniczne „Trwałość betonu. Metody badań

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

właściwości determinujących trwałość materiału w różnych warunkach eksploatacji", Kraków, kwiecień 2008, 97-119.
[7] Deja J., Kijowski P., *ABC betonu*, Polski Cement, Kraków 2002.
[8] Fagerlund G., *Trwałość konstrukcji betonowych*, Arkady, Warszawa 1997.
[9] Fiertak M., *Ochrona materiałowo-strukturalna betonu*, XXV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji „WPPK'2010", Szczyrk, 10-13.03.2010, tom I, 201-236.
[10] Glinicki M.A., Cieśla J., Fordański K., *Zagadnienia trwałości mostów betonowych w normach europejskich*, Międzynarodowa Konferencja „EKO-MOST 2006", Kielce, 16-17.05.2006, 115-124.
[11] Gruener M., *Korozja i ochrona betonu*, Arkady, Warszawa 1983.
[12] Jamroży Z., *Beton i jego technologie*, PWN, Warszawa 2005.
[13] Jóźwiak-Niedźwiedzka D., *Metody badania mrozoodporności betonu*, II Sympozjum Naukowo-Techniczne „Trwałość betonu. Metody badań właściwości determinujących trwałość materiału w różnych warunkach eksploatacji", Kraków, kwiecień 2008, 161-181.
[14] Kon E., *Trwałość i jakość betonu według EN 206-1*, Konferencja „Beton na progu nowego millenium", Kraków, 9-10.11.2000, 433-444.
[15] Kurdowski W., *Chemia cementu i betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
[16] Łapko A., *Eurokody – Zeszyty Edukacyjne „Buildera", Zeszyt 2 – Projektowanie konstrukcji żelbetowych*, PWB Media, Warszawa, styczeń 2011.
[17] Łukowski P., *Powierzchniowe zabezpieczenia przed korozją*, XXV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji „WPPK'2010", Szczyrk, 10-13.03.2010, tom II, 279-310.
[18] Mehta P.K., *Durability – Critical issues for the future*, Concrete International, July 1997, 27-33.
[19] Menegotto M., *fib and the development of Structural Codes in Europe*, 7th International Conference "Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures" ("AMCM 2011"), Kraków, 13-15.06.2011, 79-92.
[20] Neville A.M., *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków 2000.
[21] Nilsson L.-O., *Durability concept: pore structure and transport processes*, Advanced Concrete Technology. Concrete Properties, Elsevier, 2003, Chapter 8, 8/3-8/29.
[22] Richardson M.G., *Fundamentals of durable reinforced concrete*, Spon Press, 2002.
[23] Skalny J., Marchand J., *Sulfate attack on concrete revisited*, Kurdowski Symposium. Science of Cement and Concrete, Kraków, 20-21.06.2001, 171-187.
[24] Ściślewski Z., *Ochrona konstrukcji żelbetowych*, Arkady, Warszawa 1999.
[25] Śliwiński J., *Podstawowe właściwości betonu i jego trwałość*, Sympozjum Naukowo-Techniczne „Trwałość betonu i jej uwarunkowania technologiczne, materiałowe i środowiskowe", Kraków, kwiecień 2004, 41-51.
[26] Walraven J., Bigaj A., *The 2010 fib Model Code for concrete structures: A new approach to structural engineering*, 7th International Conference "Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures" ("AMCM 2011"), Kraków, 13-15.06.2011, 175-191.
[27] *Beton według normy PN-EN 206-1 – komentarz*, Polski Cement, Kraków 2004.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[28] *Beton według PN-EN 206-1*, Górażdże Cement S.A., Chorula, 2007.
[29] *Cement, kruszywa, beton w ofercie Grupy Górażdże*, Górażdże Cement S.A., Chorula, czerwiec 2009.
[30] *fib* – Model Code 2010, First complete draft, March 2010, Volume 1 (*fib* – Bulletin 55), Volume 2 (*fib* – Bulletin 56).
[31] PN-EN 206-1:2003 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
[32] PN-EN 206-1:2003/A2:2006 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
[33] PN-B-06265:2004 Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1:2003 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
[34] PN-EN 1990:2004/A1:2008 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
[35] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
[36] Wikipedia (http://en.wikipedia.org/wiki/Concrete-degradation).
[37] Paving Expert (http://www.pavingexpert.com/eff01.htm).
[38] Corrosion Club (http://www.corrosion-club.com).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ