

Zagadnienia trwałości w projektowaniu konstrukcji żelbetowych

Prof. dr hab. inż. Adam Zybura, dr inż. Andrzej Śliwka, Politechnika Śląska

1. Wprowadzenie

Problematyka trwałości projektowanych konstrukcji żelbetowych ma w naszym kraju ponad 25-letnią historię, związaną z przygotowaniem i wdrożeniem Eurokodu 2 [12]. Już na początku lat 90. ubiegłego wieku podjęto prace mające na celu wyjaśnienie i uzasadnienie metod zastosowanych w opracowanych za granicą wspólnych europejskich przepisach projektowania konstrukcji żelbetowych. Prace te trwały dość długo ze względu na ciągle zmieniające się ujęcia, stanowiące propozycje różnych wiodących krajów europejskich, w ukazujących się co pewien czas kolejnych projektach eurokodu. Analizę zaleceń Eurokodu 2 na tle stanu wiedzy i obowiązujących dotychczas w Polsce zasad projektowania zakończono wydaniem obszernej monografii [18], w której jeden z rozdziałów (2.12) poświęcony jest problemowi trwałości konstrukcji. Równoległe podejmowano także działania związane z możliwie szybkim włączeniem do norm polskich najistotniejszych i nie budzących dyskusji zapisów Eurokodu 2. W szczególności dotyczyło to zagadnień trwałości konstrukcji, które dotychczas niedoceniane, po raz pierwszy w sposób bardziej precyzyjny zostały ujęte w normie PN-B-03264:1999 [14]. Zasady postępowania wraz z proponowaną wówczas klasyfikacją środowiska omówiono w książce [7], zawierającej także analizę innych zmian normowych, związanych z cechami materiałowymi, obliczeniami wytrzymałościowymi oraz wymaganiami konstrukcyjnymi.

Trzeba zaznaczyć, że wprowadzone wymagania dotyczące trwałości konstrukcji żelbetowych w środowisku inżynierskim zostały odebrane niejednoznacznie. Konieczność stosowania lepszej jakości betonu nie wzbudzała kontrowersji, jednak propozycje powiększenia grubości otuliny przyjmowano z dystansem. Obawiano się zwiększenia obciążenia ciężarem własnym – szczególnie elementów prefabrykowanych oraz większej szerokości rys na powierzchni grubszych otulin. Podjęte dalsze prace udoskonalające spowodowały wprowadzenie do użytku kolejnej normy PN-B-03264:2002 [13], w której uwzględniono bardziej aktualne przepisy Eurokodu 2, a zagadnienia zapewnienia trwałości konstrukcji ujęto już w sposób bardzo zbliżony do istniejącego obecnie [12]. Ujednolicenie zasad i wymagań normowych wspomogły prace konferencji tematycznej zorganizowanej przez Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie [10], po której opublikowano podręcznik [9], popularyzujący nowe przepisy i ułatwiający ich wdrażanie do praktyki inżynierskiej. W podręczniku tym rozdział 5 poświęcono trwałości konstrukcji [20].

Norma PN-B-03264:2002 [13] była pomostem między metodami projektowania konstrukcji żelbetowych stosowanymi w kraju i Europie Zachodniej, przybliżając stopniowo wymagania Eurokodu 2 przed jego pełnym obowiązywaniem u nas. Ostatnim krokiem ewolucji zasad projektowania konstrukcji żelbetowych – w tym zapewnienia trwałości – jest obecna norma PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2 [12]. Ujęte w tej normie, a wcześniej w normie [13], wymagania zapewniające trwałość projektowanych konstrukcji żelbetowych były obszernie analizowane i omawiane m.in. w artykułach [21, 24, 25], podręczniku [23] oraz kilkakrotnie na Konferencji „Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji”, podsumowanych w bieżącym roku wykładem [26]. Pomimo to szereg problemów dotyczących trwałości konstrukcji żelbetowych stwarza trudności przy projektowaniu, wywołując niepewność w podejmowaniu decyzji. W niniejszym artykule starano się zwięźle przedstawić zasady zapewnienia trwałości projektowanych konstrukcji żelbetowych w nawiązaniu do zapisów normowych Eurokodu 2 [12]. Zacytowane zasadnicze wymagania wydzielono w tekście pismem pochyłym, rezygnując z umieszczenia jednoznacznie sformułowanych warunków, nie wymagających dodatkowych wyjaśnień.

2. Ogólne zasady zapewnienia trwałości konstrukcji

Zasady postępowania przy zapewnieniu trwałości projektowanych konstrukcji żelbetowych ujmuje Eurokod 2 (PN-EN 1992-1-1 [12]) w rozdziale 4 oraz załączniku E. Tytuł tego rozdziału oprócz słowa *trwałość* zawiera także *otulenie zbrojenia*, co podkreśla szczególną rolę zewnętrznych stref betonu chroniących elementy żelbetowe przed uszkodzeniem. Zasadnicze przesłanie wskazuje, że *trwała konstrukcja powinna przez cały projektowy okres użytkowania spełniać wymagania ze względu na użyteczność, nośność i stateczność, bez istotnego obniżenia przydatności lub nadmiernych, nieprzewidzianych kosztów utrzymania*.

Jednak dość często w postępowaniu projektowym poprzestaje się na wykazaniu spełnienia stanów granicznych, wynikających z rozwiązań statyczno-wytrzymałościowych. Mniejsze znaczenie przypisuje się innym wymaganiom, pozwalającym wykluczyć konieczność zbyt częstych remontów, które utrudniają użytkowanie i generują w przyszłości znaczne wydatki finansowe.

Istotny wzrost kosztów utrzymania wynikający z konieczności nieuniknionych napraw następuje od chwili rozpoczęcia

Tabela 1. Wymagania dotyczące ochrony konstrukcji żelbetowych

Warunki normowe [12]	Wskazania decydujące o trwałości [15, 19]	
Planowane zastosowanie	Lokalizacja i przeznaczenie obiektu Położenie elementów w obiekcie Kształt elementów Rozwiązania techniczne Szczegóły	
Projektowy okres użytkowania PN-EN 1990 [15]	Kategoria	1. Konstrukcje tymczasowe – 5 lat
		2. Wymienialne części konstrukcji – 10–25 lat
		3. Konstrukcje rolnicze i podobne – 15–30 lat
		4. Konstrukcje budynków i inne zwykłe – 50 lat
		5. Konstrukcje budynków monumentalnych, mosty i inne konstrukcje inżynierskie – 100 lat
Program utrzymania	Konstrukcje trwałe (główne) – nie powinny wymagać dodatkowych zabiegów w projektowym okresie użytkowania Elementy wymienialne – okres krótszy od czasu użytkowania konstrukcji głównej Części naprawialne – remonty planowe lub doraźne	
Oddziaływania	Wpływy mechaniczne (naprężenia, odkształcenia) Podłoże gruntowe Atmosfera zewnętrzna Środowisko wewnętrzne Czynniki biologiczne	

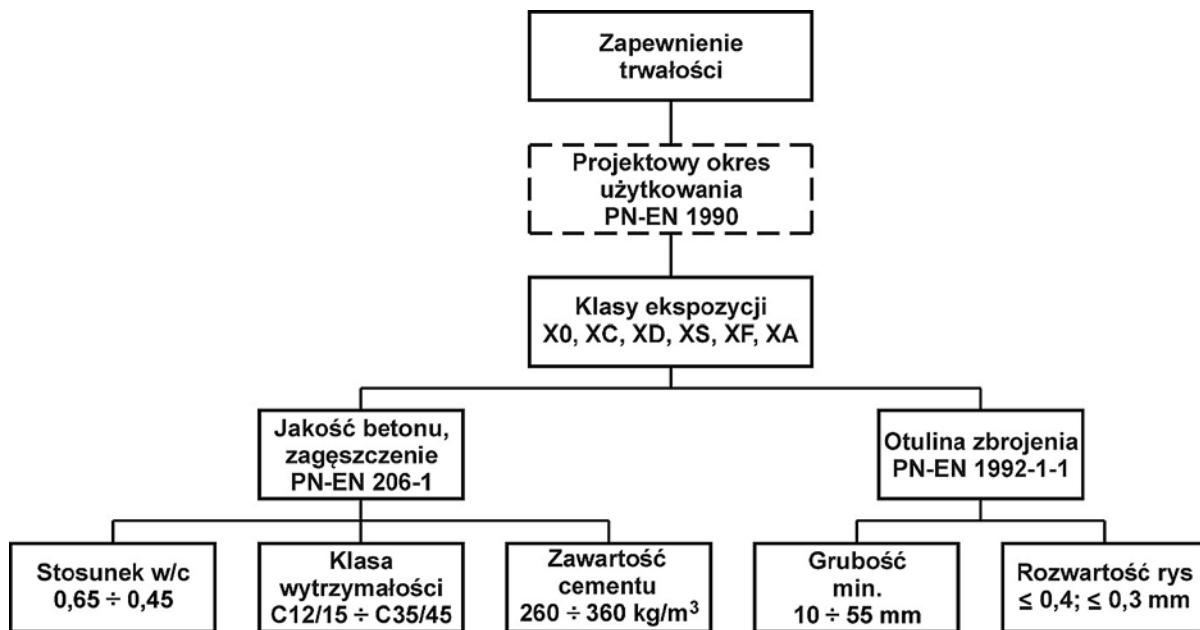
się korozji zbrojenia. Z tego powodu w przepisach projektowania [12] podstawowe znaczenie nadaje się zapobieganiu korozji zbrojenia i wskazaniu kierunków działań prowadzących do tego celu.

W analizie przyczyn i skutków zagrożenia *wymaganą ochronę konstrukcji należy ustalać, biorąc pod uwagę planowane zastosowanie, projektowy okres użytkowania, program utrzymania oraz oddziaływania*. Zasady prawidłowej ochrony obiektów żelbetowych przed agresywnymi wpływami obszernie przedstawiono w monografii [19]. Na podstawie tej pracy oraz w nawiązaniu do normy [12] w tabeli 1 zestawiono podstawowe wymagania dotyczące ochrony konstrukcji żelbetowych. Rozważając planowane zastosowanie, wyodrębnia się specyfikę zarówno całych, odmiennie użytkowanych obiektów, jak też poszczególnych elementów budowli, których położenie ma wpływ na zróżnicowane zagrożenie korozyjne zbrojenia. Zgodnie z własnym rozeznaniem konieczne jest określenie znaczenia czynników niebezpiecznych, w zależności od lokalizacji, kształtu, przeznaczenia i rozwiązań technicznych budowli oraz jej elementów.

Chociaż Eurokod 2 [12] nie określa w wymiarze czasowym projektowego okresu użytkowania, to jednak wskazuje normę PN-EN 1990 [15], gdzie zgodnie z przeznaczeniem konstrukcji wymienia się pięć kategorii projektowego okresu użytkowania. Konstrukcje żelbetowe stanowią najczęściej konstrukcje budynków i inne konstrukcje zwykłe, które są zaliczone do 4. kategorii z projektowym okresem użytkowania 50 lat. Trwałość w ujęciu normowym odpowiada projektowemu okresowi użytkowania i jest określona czasem, po którego upływie obiekt budowlany lub jego część osiągnęły stan graniczny użytkowania i mogą nie spełniać wymagań użytkowych. Po osiągnięciu tego okresu należy liczyć się z ewentualną koniecznością przywrócenia konstrukcji do początkowego stanu technicznego. Elementy obiektu budowlanego najczęściej charakteryzują się zróżnicowaną trwałością, wynikającą z przesłanek

ekonomicznych [19]. Oprócz głównych elementów konstrukcyjnych o największej trwałości występują także elementy drugorzędne, których uzasadniona, wcześniejsza naprawa lub wymiana powinna być przewidywana już na etapie projektowania w programie utrzymania. W wielu wypadkach od prawidłowego ustalenia i wypełniania programu utrzymania (remonty odwodnienia, pokrycia dachu, izolacji, wypraw elewacyjnych itp.) zależy trwałość głównych elementów konstrukcyjnych. Ochrona konstrukcji żelbetowych musi uwzględniać także oddziaływania, co wynika wprost z konieczności spełnienia stanów granicznych nośności, użytkowości i stateczności. Część oddziaływań, oprócz skutków mechanicznych (naprężenia, odkształcenia), może powodować pogorszenie właściwości użytkowych i prowadzić do zbyt szybkiego zużycia (np. działanie wody, temperatury itp.).

Zapewniając trwałość konstrukcji, należy uwzględnić wszystkie czynniki wpływające na obiekt, w tym *rozpatrzyć ewentualną rolę oddziaływań bezpośrednich i pośrednich, warunków w środowisku oraz skutków ich wspólnego, jednoczesnego działania*. Oddziaływania pośrednie same nie powodują niszczenia betonu lub zbrojenia, jednak mogą wywierać wtórny wpływ na postęp degradacji i trwałość konstrukcji. Szczególne znaczenie ma ograniczenie swobody przemieszczeń (np. w dylatacjach) i wymuszenie tym nieprzewidywanych sił, powodujących dodatkowe odkształcenia. Oddziaływania pośrednie mogą powstawać w wyniku zmian zachodzących w czasie i z tego powodu norma [12] zwraca uwagę na znaczenie odkształceń reologicznych wywołanych pęczaniem i skurczem betonu. Nadmierne odkształcenia sprzyjają wystąpieniu dodatkowych zarysowań, ułatwiających penetrację substancji agresywnych w głąb mikrostruktury betonu i przyspieszających procesy niszczące. Oprócz pojedynczych oddziaływań należy uwzględnić jednoczesny wpływ zróżnicowanych czynników i ich synergiczny skutek. Wymienione dotychczas wymagania stanowią ogólne zasady, które powinny być spełnione, aby konstrukcja żelbetowa była



Rys. 1. Schemat zapewnienia ochrony stali zbrojeniowej według norm [12, 17]

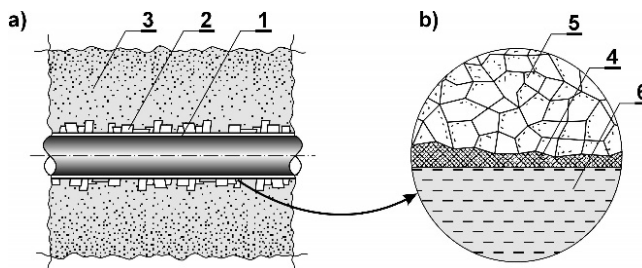
w miarę odporna na agresywne wpływy. Jednak szczególne znaczenie w działaniach ochronnych ma uwzględnienie warunków w środowisku, od których zależy przebieg w czasie procesów niszczących i dobór środków zabezpieczających. Zasadnicze warunki środowiskowe norma [12] ujmuje w tablicy (4.1), wymieniając klasy ekspozycji, obejmujące przypadki:

- nie stwarzające niebezpieczeństwa korozji zbrojenia i uszkodzenia betonu (klasa X0),
- zagrażające korozją zbrojenia na skutek karbonatyzacji betonu (klasy XC) i działania chlorków (klasy XD i XS),
- uszkodzenia betonu w wyniku zamrażania/rozmarzania (klasy XF) i agresji chemicznej (klasy XA).

W ramach klas ekspozycji są wydzielone grupy usystematyzowane w kolejności wywoływanych skutków – od w miarę łagodnych do bardzo znaczących. Obszerne omówienie podanych w tablicy normowej [12] warunków środowiskowych zawiera artykuł [25].

3. Zabezpieczenie przed niekorzystnymi wpływami

Według Eurokodu 2 [12] w projekcie konstrukcji żelbetowych należy zwrócić uwagę na zabezpieczenie zbrojenia, uwzględniając, że *ochrona stali przed korozją zależy od zagęszczenia, jakości i grubości otuliny betonowej i od zarysowania*. Norma [12] podaje także wskazówki dotyczące technologii betonu. *Zagęszczenie i jakość otulenia osiąga się, kontrolując maksymalny współczynnik woda-cement i minimalną zawartość cementu, które mogą być związane z minimalną klasą betonu*. Parametry materiałowe i geometryczne przyjmuje się w nawiązaniu do klasyfikacji ekspozycji środowiskowej oraz niejawnie określonego projektowego okresu użytkowania 50 lat,

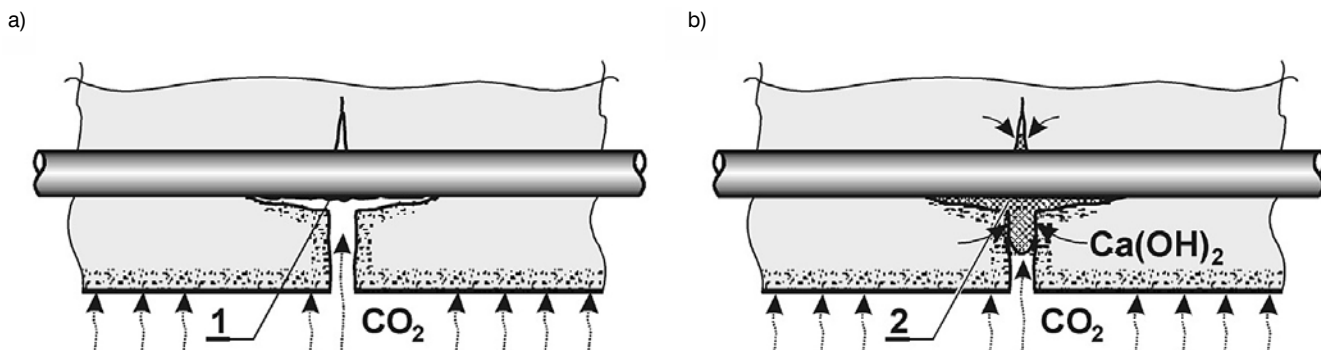


Rys. 2. Schemat kontaktu zbrojenia z betonem: a) skala makro, b) skala mikro (opis w tekście) [22]

zgodnie ze schematem blokowym zamieszczonym na rysunku 1. Stosuje się przy tym warunki podane w normach PN-EN 206-1 [17] i PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2 [12].

Wyjaśniając znaczenie ochronne poszczególnych cech materiałowych i geometrycznych, należy podkreślić, że zasadniczo zabezpieczenie zbrojenia przed korozją zapewnia wysoki odczyn zasadowy betonu. Odczyn zasadowy nadają zawarte w cemencie alkalia, które są rozpuszczone w zaadsorbowanej w porach wodzie (wilgoci). Roztwór wodny o $pH \geq 12,5$ powoduje samorzutne pokrycie powierzchni stali nanowarstwą pasywną (ochronną) w kontakcie między zbrojeniem i stwardniałym zaczynem cementowym.

Połączenie zbrojenia z betonem, wyszczególniając warstwę podwójną na styku metalu z roztworem – 1, kryształ $CaO \cdot H_2O$ w strefie przejściowej – 2, porowaty zaczyn – 3 z roztworem wodnym – 6, nanowarstwą pasywną – 4 oraz strukturę stali – 5 przedstawiono na rysunku 2. Nanowarstewka pasywna oddziela strukturę stali od roztworu wodnego i stanowi barierę ochronną blokującą korozję zbrojenia. Zagrożenie korozją zbrojenia (osiągnięcie kresu trwałości) jest spowodowane



Rys. 3. Schemat rozwoju korozji zbrojenia w rysie na skutek zobojętnienia betonu: 1 – korozja stali, 2 – szczelne produkty reakcji [20]

ARTYKUŁY PROBLEMOWE

dekompozycją nanowarstewki pasywnej, na skutek działania substancji agresywnych z zewnątrz.

Pogorszenie właściwości ochronnych zależy od dwóch czynników: szybkości wnikania nieobojętnych składników do betonu oraz zawartości alkaliów.

Szybkość wnikania substancji nieobojętnych z otoczenia jest uzależniona od szczelności struktury betonu, określanej współczynnikiem w/c oraz pośrednio klasą wytrzymałości (por. rys. 1). W celu ograniczenia możliwości dyfuzji w betonie wymaga się, aby w miarę wzrostu agresywności środowiska stosować coraz mniejsze wartości stosunku w/c oraz coraz wyższe klasy wytrzymałości betonu [17]. Szczelność betonu otuliny zależy także od prawidłowej pielęgnacji na mokro młodego betonu, co powinno wykluczyć powstawanie mikropęknięć, stanowiących drogi szybkiego transportu substancji agresywnych do wnętrza betonu [8].

Stopień zabezpieczenia zbrojenia przed korozją zależy od nasycenia zawartej w porach betonu wody (wilgoci) alkaliami pochodzącymi z cementu (por. rys. 1). Im więcej cementu zawiera beton, tym wyższy jest zapas alkaliów zapewniających wysoką zasadowość roztworu w porach. Wysoki zapas alkaliów jest wskazany ze względu na antykorozyjne oddziaływanie betonu na stal zbrojeniową. Wymaga się, aby w niekorzystnych warunkach środowiskowych stosować zwiększoną zawartość cementu [17].

Otulina betonowa (por. rys. 1) odgradza zbrojenie od bezpośredniego działania czynników środowiskowych. Zagrożenie korozją zbrojenia następuje dopiero po przejściu substancji agresywnych przez beton otuliny i dotarciu do powierzchni wkładki. Ochrona zbrojenia zależy zarówno od szczelności betonu, z którego wykonana jest otulina, jak też jej grubości. Minimalną grubość otuliny przyjmuje się w zależności od: agresywności środowiska wyrażonej klasą ekspozycji, projektowego okresu użytkowania oraz zastosowanej klasy wytrzymałości betonu (ujętych za pośrednictwem tzw. klasy konstrukcji) [12]. Zasady określania grubości otuliny przedstawiono w dalszej części – punkt 5.

Szczelność otuliny zmniejszają zarysowania (por. rys. 1), które mogą powstać w wyniku obciążeń mechanicznych oraz z powodu przyczyn technologicznych. Ze względów m. in. na trwałość konstrukcji zarysowanie należy ograniczyć do wartości dopuszczalnych [12]:

- $w_{max} = 0,4$ mm (klasy ekspozycji X0, XC1),

- $w_{max} = 0,3$ mm (w pozostałych przypadkach za wyjątkiem klasy ekspozycji XD3).

Graniczne wartości szerokości rys w_{max} są stosunkowo duże i obowiązują przy *prawie stałej kombinacji obciążeń* oraz zagrożeniu korozyjnym zbrojenia, związanym z karbonatacją betonu i w miarę łagodnym działaniem chlorków.

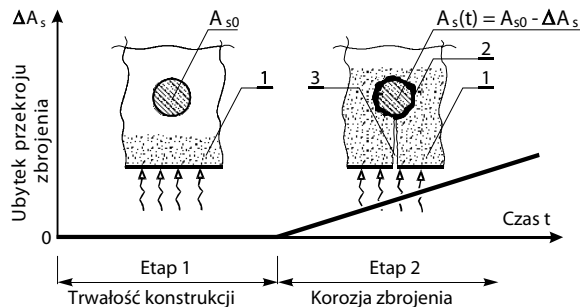
W podejściu normowym przyjęto pogląd, że korozja zbrojenia w strefie rys może przebiegać w dwóch etapach – rysunek 3:

- początkowo następuje inicjacja i rozwój korozji stali na skutek zobojętnienia wnętrza rysy (por. rys. 3a),
- w dłuższym okresie czasu korozja ulega istotnemu spowolnieniu w wyniku zapełniania rysy produktami korozji – dochodzi do realkalizacji strefy aktywnej i powstrzymania korozji (por. rys. 3b).

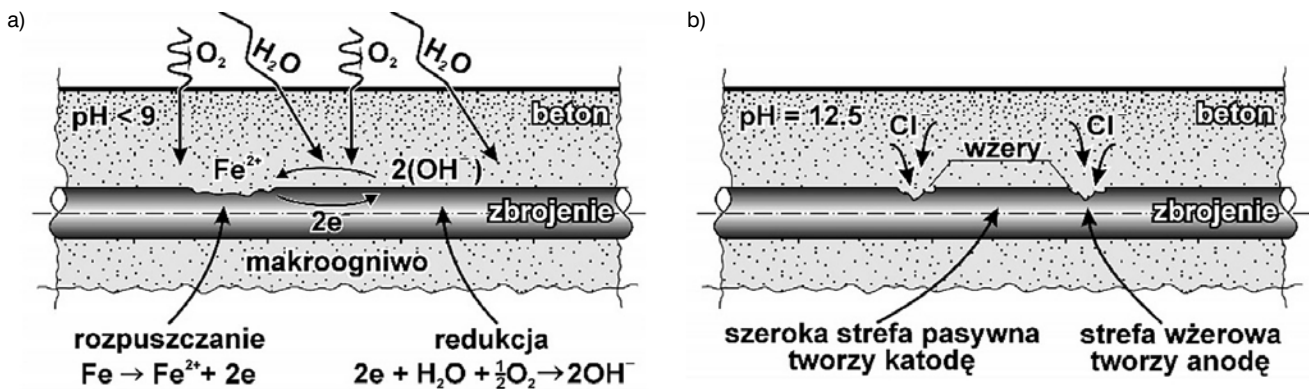
Do tych bardzo liberalnych dopuszczalnych rozwartości należy podchodzić bardzo ostrożnie, gdy mogą powstawać rysy okresowo otwierające się, których uszczelnienie produktami reakcji będzie utrudnione [20]. W środowisku agresywnym chemicznie (także klasie ekspozycji XD3) powinno się rozważyć zastosowanie zabezpieczenia powierzchniowego w postaci szczelnych i elastycznych izolacji.

4. Przebieg procesów niszczących

Ograniczona trwałość konstrukcji żelbetonowych jest wywołana głównie wpływami otoczenia. Występujące w rzeczywistości złożone przypadki, w podejściu technicznym sprowadza się do schematów określających zasadnicze przyczyny i skutki



Rys. 4. Skutki wpływu środowiska na żelbet: 1 – beton o pogorszonych właściwościach ochronnych, 2 – produkty korozji zbrojenia, 3 – pęknięcie otuliny wywołane produktami reakcji [21]



Rys. 5. Schemat ogniw korozyjnego na zbrojeniu, wywołanego: a) zubożeniem betonu, b) działaniem chlorków [22]

przebiegających zjawisk. Ujęcie normowe [12] porządkuje definicja: warunki ekspozycji są to warunki chemiczne lub fizyczne, na które – w dodatku do oddziaływań mechanicznych – wystawiona jest konstrukcja.

Jak wcześniej wspomniano, zasadnicze wpływy środowiskowe określa zwięzła tablica (4.1) wskazująca, oprócz klas ekspozycji, także przykłady występowania. Ponieważ przyjęcie odpowiedniej klasy ekspozycji jest niekiedy trudne, więc w wielu wypadkach prawidłowe ustalenia ułatwia analiza przebiegu procesów niszczących.

Ekspozycja konstrukcji żelbetonowych w warunkach środowiskowych wywołuje reakcje chemiczne początkowo w powierzchniowych strefach betonu. W miarę upływu czasu reakcje te są przenoszone w głąb betonu na skutek dyfuzji reagentów. Beton otuliny traci stopniowo właściwości ochronne. Ewolucję niekorzystnych zmian na styku otuliny betonowej i zbrojenia przedstawiono na rysunku 4.

Początkowo, gdy substancja agresywna znajduje się w przypowierzchniowych strefach otuliny, zbrojenie jest zabezpieczone przed korozją – etap 1. Po dotarciu obszaru pogorszonych właściwości ochronnych do powierzchni zbrojenia rozpoczyna się korozja stali – etap 2.

Występowanie etapu 1 jest równoważne z trwałością konstrukcji i odpowiada projektowemu okresowi użytkowania. W następnej kolejności (etap 2) należy spodziewać się rozwoju uszkodzeń korozyjnych na skutek procesów o charakterze elektrochemicznym [22], przebiegających zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 5.

Pogorszone właściwości ochronne betonu powodują uszkodzenie tlenkowej nanowarstewki pasywnej na powierzchni stali (por. rys. 2b). W miejscu uszkodzenia nanowarstewki tworzy się strefa anodowa i powstaje ubytek korozyjny. Poza strefą anodową, w obecności tlenu, zachodzi reakcja katodowa. Działanie ogniw korozyjnych w warunkach karbonatyzacji betonu prowadzi do korozji o charakterze ogólnym i ubytków korozyjnych o mniejszej głębokości, na większej powierzchni wkładek (por. rys. 5a). Obecność chlorków wywołuje korozję lokalną z głębokimi wżerami na małych strefach anodowych (por. rys. 5b).

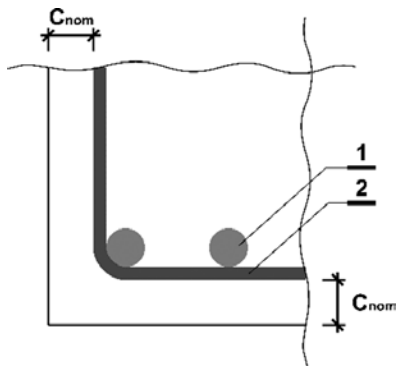
Podana w normie PN-EN 1992-1-1 [12] klasyfikacja środowiska (tablica 4.1) nie ujmuje wszystkich czynników wpływających na trwałość konstrukcji żelbetonowych. *Należy także*

uwzględnić szczególne formy agresywnych lub pośrednich oddziaływań włącznie z: oddziaływaniami chemicznymi powstającymi na skutek np.: użytkowania budynku lub konstrukcji (składowanie płynów itd.), działania roztworów kwasów albo soli siarczanowych, działania chlorków zawartych w betonie, reakcji alkalia – kruszywo, oraz oddziaływaniami fizycznymi powstającymi na skutek np.: zmian temperatury, ścierania, przenikania wody.

Bardzo niekorzystne zmiany w wewnętrznej strukturze betonu może powodować działanie roztworów kwasów i soli siarczanowych oraz reakcje alkalia – kruszywo. Korozja siarczanowa betonu najczęściej zachodzi pod wpływem wody gruntowej lub gruntu zawierającego siarczan. Przemiany obejmują najłatwiej reagujące składniki stwardniałego zaczynu cementowego – wodorotlenek wapnia oraz gliniany wapnia [8, 11]. Z tego powodu skład mineralny cementu ma duży wpływ na odporność betonu na działanie środowiska agresywnego, w tym siarczanów. Wewnątrz betonu siarczany przekształcają się w etringit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) lub gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Krystalizacja zachodzi ze zwiększeniem objętości, powodując rozsadzanie mikrostruktury betonu. W środowisku umiarkowanie i silnie agresywnym (XA2 i XA3), sprzyjającym korozji siarczanowej betonu, zaleca się stosować cementy odporne na siarczany SR i HSR [3].

Zagrożenie reakcją alkalia – kruszywo wynika z obecności reaktywnego kruszywa (opal, chalcedon, trydynit), które z zasadowymi składnikami betonu tworzą na ziarnach żel alkaliczno-krzemionkowy [11]. Ten żel absorbuje wodę, zwiększa objętość i wywołuje destrukcyjne naprężenia. Najczęściej na korozję alkaliczną są narażone elementy podlegające ciąglemu lub zmiennemu oddziaływaniu wilgoci. Powstanie żelu krzemianu sodowo-potasowego nie powoduje jeszcze destrukcji betonu. Dopiero absorpcja wody prowadzi do pęcznienia i powstania spękań [3]. Reakcje alkaliczne ogranicza wilgotność betonu poniżej 80–85% oraz zmniejszona zawartość alkaliów, którą uzyskuje się stosując cementy CEM II–CEM V, zawierające granulowany żużel wielkopiecowy i popioły lotne krzemionkowe. Zaleca się także cementy specjalne, niskoalkaliczne (NA) [3].

Chlorki wprowadzone w trakcie wykonywania betonu do mikrostruktury wewnętrznej (np. z kruszywem, wodą zarobową itp.) powodują dodatkowe oddziaływania pośrednie, kumulując się



Rys. 6. Zasada przyjmowania otulenia nominalnego c_{nom} : 1 – zbrojenie główne, 2 – strzemię

z chlorkami wnikającymi z otoczenia. Norma PN-EN 206-1 [17] ogranicza łączne stężenie jonów chloru w betonie i wskazuje, że do betonu zawierającego zbrojenie stalowe, sprężające zbrojenie stalowe oraz inne elementy metalowe nie należy dodawać chlorku wapnia oraz domieszek na bazie chlorków.

5. Ochrona zbrojenia przed korozją

Zaprojektowanie trwałej budowli żelbetowej, oprócz wszystkich omówionych wcześniej aspektów, wymaga właściwego przyjęcia otulenia betonem zbrojenia. Norma PN-EN 1992-1-1 [12] postanawia, że otuleniem betonowym nazywa się najmniejszą odległość między powierzchnią zbrojenia (z włączeniem połączeń i strzemion oraz zbrojenia powierzchniowego, gdy jest istotne) i powierzchnią betonu. Na rysunkach należy podać otulenie nominalne c_{nom} , które jest sumą otulenia minimalnego c_{min} i dodatku ze względu na odchyłkę Δc_{dev} ($c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$). Wartość zalecana odchyłki wynosi $\Delta c_{dev} = 10$ mm, przy czym istnieje możliwość jej zmniejszenia w wypadku stosowania przy wytwarzaniu konstrukcji systemu zapewnienia jakości oraz kontroli bardzo dokładnymi urządzeniami pomiarowymi [12]. Zasadę przyjmowania otulenia nominalnego w przekroju elementu żelbetowego pokazano na rysunku 6. Według Eurokodu 2 [12] składowe otulenie minimalne c_{min} powinno zapewniać: bezpieczne przekazywanie sił przyczepności, ochronę stali przed korozją (trwałość) oraz odpowiednią odporność ogniową, którą ujmują odrębne przepisy, zamieszczone w normie PN-EN 1992-1-2 [16]. Otulenie minimalne c_{min} określa podany w normie [12] wzór (4.2), z którego uwzględnia się największą z trzech wartości: $c_{min,b}$ – minimalne otulenie ze względu na przyczepność, $c_{min,dur}$ – minimalne otulenie ze względu na warunki środowiska oraz 10 mm. Ponadto w tym wzorze zawarte są składniki, dotyczące dodatkowych wpływów związanych z oddziaływaniem środowiska: $\Delta c_{dur,y}$ – ze względu na bezpieczeństwo, $\Delta c_{dur,st}$ – ze względu na stosowanie stali nierdzewnej oraz $\Delta c_{dur,add}$ – ze względu na stosowanie dodatkowego zabezpieczenia. Obecnie w każdym przypadku wartością zalecaną tych dodatkowych składników jest zero. Minimalne otulenie ze względu na przyczepność $c_{min,b}$ wskazuje proste zalecenia normowe, natomiast minimalne otulenie ze względu na warunki środowiskowe $c_{min,dur}$ określa się na podstawie zakładanych klasy ekspozycji oraz klasy konstrukcji [12].

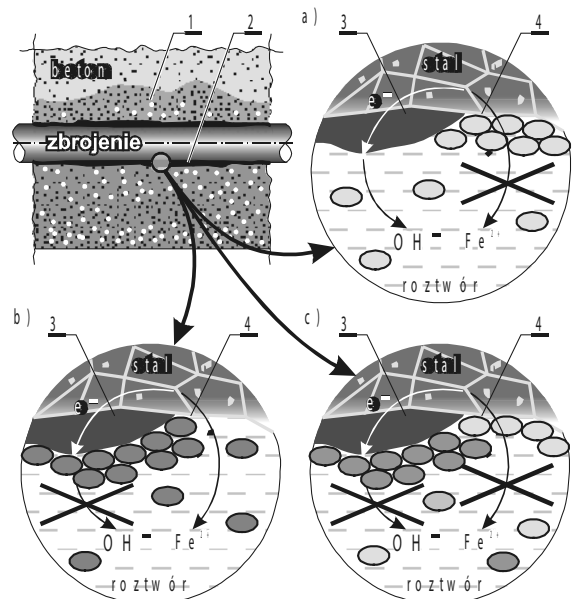
Klasa konstrukcji stanowi niejawną zależność między kategorią projektowego okresu użytkowania według normy PN-EN 1990 [15] oraz odpornością betonu na wnikanie substancji agresywnych z zewnątrz (wyrażoną stosunkiem w/c i pośrednio klasą wytrzymałości betonu).

Zalecaną klasę konstrukcji S4, odpowiadającą projektowemu okresowi użytkowania 50 lat, można modyfikować, uwzględniając inny projektowy okres użytkowania lub szczególne warunki konstrukcyjne i realizacyjne [12].

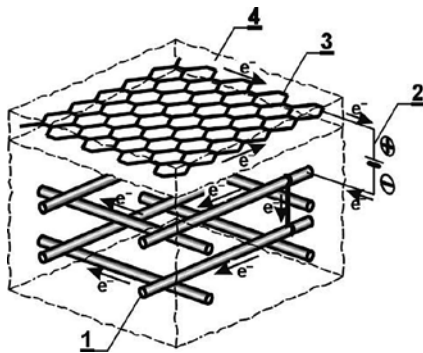
W Eurokodie 2 [12] wspomina się także o możliwości stosowania do ochrony zbrojenia środków specjalnych: stali nierdzewnej, powłok oraz ochrony katodowej. Jednak w tym dokumencie brakuje dalszych wyjaśnień i wskazówek.

W kraju dodatkowe zabezpieczenie wykonuje się głównie metodami ochrony powierzchniowej betonu, zarówno w celu zwiększenia trwałości konstrukcji żelbetowych, jak ich naprawy. Szczegółowe rozwiązania technologiczne i materiałowe zawiera książka [1]. Niestety, inne sposoby ochrony w praktyce prawie nie istnieją. Możliwa do zbrojenia stal nierdzewna, niezależnie od ograniczeń ekonomicznych, powinna charakteryzować się określonymi w normie [12] wymaganymi właściwościami mechanicznymi.

Bardziej dostępne finansowo zbrojenie o podwyższonej odporności na korozję uzyskuje się za granicą przez pokrycie prętów powłokami cynkowymi lub epoksydowymi. Powłoka cynkowa w początkowej fazie izoluje stal od czynników agresywnych, natomiast w przypadku uszkodzenia stanowi szczególną ochronę protektorową. Powłoka z tworzywa sztucznego jest elektrycznym izolatorem utrudniającym rozwój korozji elektrochemicznej. Technologię wykonywania powłok na zbrojeniu przedstawiono w artykule [5], natomiast analizę skuteczności zabezpieczenia przez cynkowanie zbrojenia zamieszczono w pracy [4].



Rys. 7. Schemat działania inhibitorów: 1 – beton o pogorszonych właściwościach ochronnych z zaadsorbowanym inhibitorem, 2 – strefa korozji zbrojenia, 3 – miejsce reakcji katodowej, 4 – miejsce reakcji anodowej (opis w tekście) [6]



Rys. 8. Schemat elektrochemicznej ochrony katodowej – opis w tekście [22]

Do zabezpieczenia zbrojenia przed korozją próbowano stosować inhibitory wprowadzane do mikrostruktury betonu otuliny. Wzorując się na inhibitorowej ochronie metalowych instalacji przemysłowych, proponowano związki nieorganiczne i organiczne, które powinny działać hamująco na reakcje korozyjne (por. rys. 5). Zasadę działania tych substancji na zbrojenie przedstawiono na rysunku 7. Inhibitory anodowe powstrzymują rozkładanie żelaza (por. rys. 7a), inhibitory katodowe ograniczają reakcje katodowe w obecności tlenu (por. rys. 7b), natomiast inhibitory mieszane powodują blokowanie obu reakcji anodowych i katodowych (por. rys. 7c). Pomimo obiecujących przesłanek nie udało się jednak dotychczas potwierdzić w warunkach krajowych satysfakcjonującej skuteczności tego typu zabezpieczeń [2, 6].

Do bardziej zaawansowanych metod przeciwnokorozyjnych należy ochrona katodowa, stosowana za granicą w szczególnie odpowiedzialnych obiektach żelbetonowych. Ochrona ta polega na blokowaniu przez przeciwnie skierowany prąd stały anodowych reakcji korozyjnych (por. rys. 5).

Schemat ochrony katodowej w żelbecie przedstawiono na rysunku 8. Zbrojenie – 1 łączy się z ujemnym biegunem prądu stałego – 2, natomiast biegun dodatni z siatką anodową – 3 wykonaną z platynowanego tytanu, którą umieszcza się na powierzchni betonu konstrukcji i zabezpiecza trwałym pokryciem – 4. Przebieg, technikę i przykłady zastosowania ochrony katodowej przedstawiono w pracy [22].

6. Podsumowanie

Wprowadzenie do stosowania Eurokodu 2 spowodowało zwrócenie większej uwagi na zapewnienie trwałości projektowanym konstrukcjom żelbetonowym. Jednak w wielu wypadkach postępuje się rutynowo, przyjmując na podstawie klasyfikacji ekspozycji środowiskowej grubość otuliny zbrojenia oraz wymagania dotyczące jakości betonu. Nie zauważa się przy tym i pomija wiele innych czynników, które mają także wpływ na zachowanie się konstrukcji w czasie. W niniejszej pracy starano się wyjaśnić najistotniejsze wymagania normowe, w nawiązaniu do fizycznych i elektrochemicznych aspektów oddziaływania środowiska. Zwrócono uwagę na znaczenie przewidywanych warunków użytkowania całego obiektu oraz jego elementów, a także wpływu potencjalnie rozwijających się w przyszłości procesów niszczących na wybór w projekcie środków

zaradczych. Zabezpieczenie zbrojenia przed korozją według obecnych przepisów normowych zapewnia głównie otulina betonowa. Poza tym Eurokod 2 wymienia możliwość stosowania środków specjalnych, które w pracy starano się nieco przybliżyć, podając zasady działania i sposoby ich użycia.

Artykuł opracowano na podstawie wykładu prezentowanego na WPPK 2018

BIBLIOGRAFIA

- [1] Czarnecki L., Łukowski P., Garbacz A., Naprawa i ochrona konstrukcji z betonu. Komentarz do PN-EN 1504, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2017
- [2] Czarnecki L. (red.) i in., Ocena skuteczności działania migrujących inhibitorów korozji stali w betonie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2008
- [3] Giergiczyński Z., Kiedy stosujemy cementy odporne na siarczany (SR, HSR) oraz niskoalkaliczne (NA) w składzie betonu, BTA Budownictwo, Technologia, Architektura 4/2017, str. 66–71
- [4] Jaśniok M., Zabezpieczenie stali zbrojeniowej przed korozją w betonie metodą cynkowania ogniowego, Przegląd Budowlany 2/2018, str. 18–23
- [5] Jaśniok M., Zybura A., Zabezpieczenie i regeneracja zagrożonych korozją konstrukcji z betonu. Zabezpieczenie prętów zbrojeniowych powłokami ochronnymi (cz. II), Przegląd Budowlany 2/2007, str. 26–32
- [6] Jaśniok T., Sliwka A., Zybura A., Wpływ inhibitorów migrujących na stopień ograniczenia korozji zbrojenia w elementach zarysowanych, Inżynieria i Budownictwo 62, 4/2006, str. 219–223
- [7] Józwiak I., Kliszczewicz R., Zybura A., Zasady projektowania konstrukcji żelbetonowych na podstawie PN-B-03264:1999, Arkady, Warszawa, 2001
- [8] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010, PWN, Warszawa, 2010
- [9] Lewicki B. (red.), Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Komentarz naukowy do PN-B-03264:2002, tom 1 i 2, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2005
- [10] Materiały konferencyjne Instytutu Techniki Budowlanej, Komentarz naukowy do PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone, tom 1 i 2, Warszawa, 2003
- [11] Owsiak Z., Korozja wewnętrzna betonu, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2015
- [12] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [13] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Obliczenia statyczne i projektowanie
- [14] PN-B-03264:1999 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Obliczenia statyczne i projektowanie
- [15] PN-EN 1990 Podstawy projektowania konstrukcji
- [16] PN-EN 1991-1-2:2006 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru
- [17] PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [18] Sekcja Konstrukcji Betonowych KILiW PAN: Podstawy projektowania konstrukcji żelbetonowych i sprężonych według Eurokodu 2, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2006
- [19] Ściślewski Z., Ochrona konstrukcji żelbetonowych, Arkady, Warszawa, 1999
- [20] Ściślewski Z., Zybura A., Trwałość konstrukcji, [w]: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Komentarz naukowy do PN-B-03264:2002, Lewicki B. (red), Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2005
- [21] Zybura A., Metody zapewnienia trwałości budowli na przykładzie budownictwa betonowego, [w]: Problemy naukowo-badawcze budownictwa, tom IV Zrównoważony rozwój w budownictwie, PAN KILiW, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2008, str. 235–252
- [22] Zybura A., Zabezpieczenie konstrukcji żelbetonowych metodami elektrochemicznymi, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2003
- [23] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych – tom 2. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2011
- [24] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., O trwałości, diagnostyce i obserwacji konstrukcji żelbetonowych, Inżynieria i Budownictwo 66, 10/2010, str. 519–525
- [25] Zybura A., Sliwka A., O interpretacji warunków środowiskowych przy określaniu klasy ekspozycji w projektach konstrukcji żelbetonowych, Inżynieria i Budownictwo 66, 3/2010, str. 116–120
- [26] Zybura A., Sliwka A., Projektowanie konstrukcji żelbetonowych z uwzględnieniem trwałości, XXIII Ogólnopolskie Warsztaty Projektanta Konstrukcji. Innowacyjne i współczesne rozwiązania w budownictwie. Konstrukcje żelbetowe, PZITB Oddział w Gliwicach, Szczyrk 2018, tom III, str. 1–47