

dr inż. Magdalena Dobiszewska¹⁾prof. dr hab. inż. Adam Podhorecki^{1)*}

Badanie uszkodzeń betonu konstrukcji hali przemysłowej

The study of concrete damage industrial hall

DOI: dx.doi.org/10.15199/33.2014.12.16

Streszczenie. W normach europejskich dużą wagę przywiązuje się do oddziaływania środowiska na konstrukcje betonowe. Szczególnie niepożądanymi zjawiskami w tych konstrukcjach jest karbonatyzacja i korozja chlorkowa betonu, które prowadzą w konsekwencji do obniżenia alkaliczności betonu. Występują jednak pewne różnice dotyczące negatywnego oddziaływania tych dwóch procesów. W artykule przedstawiono wpływ korozji betonu na stan techniczny istniejącego obiektu budowlanego.

Słowa kluczowe: konstrukcje betonowe, karbonatyzacja, korozja chlorkowa, diagnostyka, rozwiązania konstrukcyjne.

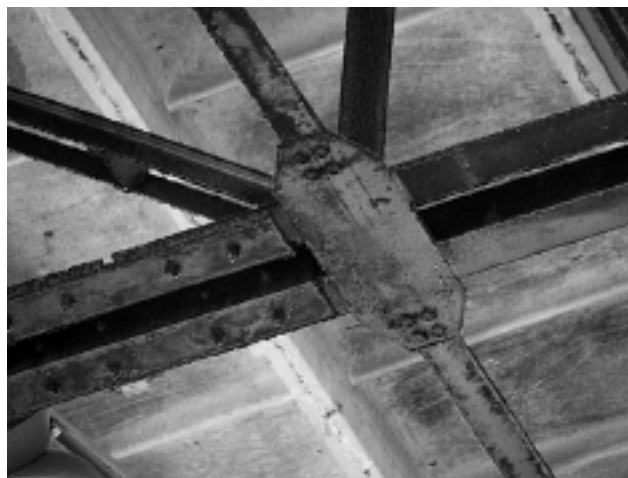
Abstract. The environmental impact on concrete structures is of great importance within Eurocodes. Concrete carbonation and chloride corrosion in such structures are particularly undesirable as they reduce concrete alkalinity levels. However, there are some differences in the negative impact of these two processes. The paper presents impact of concrete corrosion on the technical condition of the existing building.

Keywords: concrete structures, carbonation, chloride corrosion, diagnosis, design approach.

Hala papierni, wzniesiona w latach 80. zeszłego stulecia, wybudowana została w technologii uprzemysłowionej jako trójnawowy obiekt dwukondygnacyjny z dodatkowymi poziomami technologicznymi w nawach bocznych. Szkieletowy ustrój nośny hali tworzą stalowe dwutrapezowe dźwigary kratowe w rozstawie co 6,0 m, oparte na blachownicowych słupach o przekroju dwuteowym, natomiast konstrukcję nośną bocznych naw podłużnych hali – rygle blachownicowe oparte na słupach stalowych. Dach hali wykonano jako stropodach niewentylowany z żelbetowych płyt panwiowych wspartych na dźwigarach kratowych, a w nawach bocznych na ryglach stalowych. Stropodach nad środkową częścią hali osłonięty jest od spodu panelami podwieszonymi do pasa dolnego dźwigarów kratowych. Obudowę ścian zewnętrznych wykonano jako lekką, z blachy.

Stan techniczny hali

Stan techniczny stalowych kratowych dźwigarów nośnych oceniono jako zadowalający. Nie stwierdzono widocznych uszkodzeń ani nadmiernych deformacji poszczególnych elementów, a jedynie na prętach pasa dolnego (fotografia 1) zaobserwowano mocno zaawansowaną korozję powierzchniową. Stan prefabrykowanych panwiowych płyt dachowych był mocno zróżnicowany. W niektórych miejscach beton nie wykazywał uszkodzeń, a w innych zaobserwowano bardzo duże ubytki i uszkodzenia powierzchniowe. Odstonięte zostały skorodowane pręty zbrojenia części płytowej oraz żeber płyt (fotografia 2). Duże ubytki betonu widoczne były w miejscu osadzenia świetlików dachowych. Uszkodzeniu uległy także fragmenty płyt wzdłuż podłużnych żeber na styku sąsiednich płyt pan-



Fot. 1. Skorodowane pręty dźwigarów kratowych [Fot. Autorzy]



Fot. 2. Skorodowane pręty zbrojenia betonowych płyt dachowych oraz pręty dźwigarów kratowych [Fot. Autorzy]

¹⁾ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

^{*} Autor do korespondencji: e-mail: podhorec@utp.edu.pl

wiowych, betonowa powierzchnia żeber była skorodowana, a w niektórych miejscach stwierdzono luźne odspojone fragmenty betonu (fotografia 3).



Fot. 3. Uszkodzone betonowe płyty dachowe i skorodowane pręty zbrojeniowe [Fot. Autorzy]

Badania

Przeprowadzone badania betonowych płyt dachowych obejmowały określenie:

- **cech fizykomechanicznych**, tj. wilgotności, nasiąkliwości i wytrzymałości na ściskanie;
- **właściwości chemicznych** – zakres karbonatyzacji, alkaliczność (wartość pH), zawartość chlorków (Cl⁻) i siarczanów (SO₃).

W celu określenia cech fizykomechanicznych betonu płyt dachowych, do badań laboratoryjnych pobrano siedem próbek (odkute fragmenty betonu). Podczas tej czynności stwierdzono, że beton w obrębie żeber nie jest dobrze scalony i z łatwością można go odspoić, co zagraża bezpieczeństwu osób przebywających w hali. Na podstawie pomiarów ustalono, że grubość otuliny prętów zbrojeniowych była stanowczo za mała, gdyż wynosiła jedynie 7,0 ± 18,7 mm. Oznacza to, że nie spełniała funkcji ochronnej prętów zbrojeniowych (w przypadku elementów prefabrykowanych w klasie ekspozycji XC3 minimalna grubość wynosi 25 mm). W niektórych miejscach podejmowane były próby naprawy dachu, które jednak się nie powiodły. Po odkuciu luźnych fragmentów betonu dokonano podczas tych napraw reprofilacji powierzchni płyt stropowych zaprawą naprawczą typu PCC, pokryto powierzchnię betonu od spodu warstwą ochronną z zaprawy cementowo-epoksydowej, a następnie wykonano zabezpieczenie powłokowe z kompozytu polimerowego. Ułożona na płytach prefabrykowanych powłoka zabezpieczająca łuszczy się jednak i odpada (fotografia 4).

Na podstawie odkrywek ustalono następujący układ warstw na dachu (licząc od góry): papa wierzchniego krycia grubości 6 mm; 2 x papa podkładowa grubości 7 mm; 2 x styropian grubości 40 mm; powłoka bitumiczna; żelbetowa prefabrykowana płyta panwiowa. Pomiędzy poszczególnymi warstwami papy zgrzewalnej znajdowała się wo-

da. Styropian stanowiący izolację termiczną dachu był bardzo mocno nasączony wodą, a górna powierzchnia panwiowych płyt dachowych mokra na skutek braku wentylacji pokrycia dachowego. Wewnątrz hali, pod dachem, panowała wysoka temperatura ok. 50 °C, od góry natomiast była znacznie niższa (poza okresem letnim). Ze względu na to, że beton charakteryzuje się dosyć dobrymi właściwościami przewodzenia ciepła oraz na nieznaczną grubość płyt dachowych (3,5 cm), ciepło z łatwością przenikało przez płyty panwiowe. W zetknięciu z chłodnym powietrzem zewnętrznym, które przenikało do płyt dachowych z uwagi na niewielką grubość izolacji termicznej (styropian grubości 80 mm), dochodziło do wykraplania wilgoci na zewnętrznej płaszczyźnie płyt dachowych. Na powierzchni papy zaobserwowano liczne pęcherze i nierówności. W wielu miejscach pokrycie dachu wręcz „zapadło się” i nadmiernie ugięło. Zainstalowany wewnętrzny system odprowadzania wody z dachu miał wiele istotnych mankamentów.



Fot. 4. Uszkodzona powłoka ochronna płyt dachowych [Fot. Autorzy]

Analiza wyników

Określono, że średnia nasiąkliwość betonu wynosiła 4,4% i nie przekraczała dopuszczalnej, która w przypadku betonów osłoniętych przed bezpośrednim działaniem czynników atmosferycznych wynosi znacznie więcej. Średnią wilgotność względną betonu ustalono na poziomie 1,6%, co oznaczało, że betonowe płyty dachowe były w stanie suchym. Wytrzymałość betonu badano metodą nieniszczącą przy użyciu młotka Schmidta oraz metodą niszczącą, na próbkach sześciennych o wymiarach 50 x 50 x 50 mm. Charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie ustalona w badaniach niszczących (z uwzględnieniem modyfikującego współczynnika przeliczeniowego ze względu na małe wymiary próbek do badań) wyniosła 27 MPa, co odpowiada klasie betonu C25/30. Oznacza to, że ustalona klasa betonu jest wyższa od klasy wynikającej z dokumentacji projektowej.

Wnioski z badań chemicznych betonu:

- badania dotyczące ustalenia głębokości karbonatyzacji przeprowadzono za pomocą wskaźnika pH, tj. feno-

loftaleiny, która zmienia kolor z bezbarwnego na różowy przy pH powyżej 9,5. W celu pomiaru głębokości karbonatyzacji rozpylono fenoloftaleinę na zwilżony świeży przełam betonu. Stwierdzono karbonatyzację na całej grubości pobranych próbek z żeber płyt dachowych, tj. na głębokości ok. 5 cm od powierzchni zewnętrznej betonu. W części płytowej beton uległ karbonatyzacji na głębokość $2,0 \pm 2,5$ cm. Powstający w procesie karbonatyzacji węglan wapnia (CaCO_3) uszczelnia strukturę betonu, co wpływa na obniżenie przepuszczalności, a także do pewnego stopnia na wzrost wytrzymałości na ściskanie. W omawianym przypadku tłumaczy to być może wyższą od projektowanej klasę betonu płyt panwiowych (główną przyczyną większej od projektowanej wytrzymałości betonu jest oczywiście także wiek betonu). Z drugiej jednak strony karbonatyzacja prowadzi do zobojętniania, czyli obniżania odczynu zasadowego betonu, a w konsekwencji do utraty właściwości ochronnych w stosunku do stali zbrojeniowej, co zapoczątkowuje proces korozji zbrojenia w elementach żelbetowych.

We wszystkich badanych próbkach stwierdzono obniżenie pH betonu nawet do 7,77, a pH powinno wynosić $12,6 \pm 13,5$ [3]. Karbonatyzacja, w wyniku zachodzącej zmiany środowiska z zasadowego na kwaśny, spowodowała proces korozji zbrojenia. W normalnych warunkach otulina betonowa prętów zbrojeniowych chroni je przed korozją. W przypadku, gdy współczynnik pH jest mniejszy od 10, traci ona zdolność do pasywacji stali. Obecność tlenu i wilgoci prowadzi do korozji zbrojenia, a w konsekwencji do „rozsadzania” betonu, tworząc spękania i odpryski fragmentów materiału. Badania wskazują na utratę właściwości pasywujących otuliny betonowej, co sprzyja intensywnej korozji stali zbrojeniowej;

- zawartość rozpuszczalnych w wodzie jonów chlorkowych Cl^- w badanych próbkach betonu, określona klasyczną metodą chemii analitycznej, wynosiła $0,017 \pm 0,25\%$ w stosunku do masy betonu. Za wartość graniczną przyjęto całkowitą zawartość chlorków w betonie odpowiadającą 0,4% masy cementu. Przy założeniu, że do produkcji 1 m^3 mieszanki betonowej zużyto ok. 350 kg cementu, graniczną wartość chlorków można ustalić na poziomie 0,058% masy betonu. Wynika z tego, że w niektórych próbkach graniczna wartość chlorków została istotnie przekroczona. Ze względu na dużą destrukcję betonu badanych płyt dachowych, zrezygnowano z badań prowadzących do sporządzenia profilu stężenia chlorków oraz przygotowania roztworów, odwzorowujących w przybliżeniu rzeczywisty roztwór wodny, który znajduje się w porach stwardniałego betonu i następnie na tej podstawie oznaczenia stężenia chlorków;

- zawartość jonów siarczanowych (SO_3) w badanych próbkach betonu wynosiła średnio $0,011 \pm 0,196\%$ masy betonu przy dopuszczalnej maksymalnej zawartości siarczanów 3,5% masy cementu, co stanowi 0,51% masy betonu. Faktyczna ilość jonów siarczanowych była więc wyraźnie mniejsza od wartości granicznej. Przyjęta procedura określania stężenia jonów siarczanowych jest analogiczna, jak w przypadku stężenia jonów chlorkowych;

- z uwagi na bardzo zaawansowaną korozję prętów zbrojeniowych (czasami dochodzącą do 100%) zrezygno-

wano z pomiarów szczegółowych faktycznej korozji stali (metodą elektrochemiczną), tj. ustalenia prawdopodobieństwa wystąpienia korozji (badanie potencjału stacjonarnego) i jej prędkości (analiza krzywych polaryzacji).

Na podstawie badań stwierdzono, że beton, mimo bardzo dużej wilgotności w hali, jest w stanie suchym, a jego wilgotność względna to ok. 1,6%. Powstający w wyniku karbonatyzacji z wodorotlenku wapnia Ca(OH)_2 węglan wapnia CaCO_3 uszczelnia pory betonu. W efekcie zmniejszyła się jego nasiąkliwość do $3,8 \pm 5,3\%$ i nie przekroczyła nasiąkliwości granicznej 9%. Beton pozostał suchy w warunkach bardzo dużej wilgotności powietrza (dochodzącej do $70 \pm 80\%$), dzięki bardzo małej nasiąkliwości. Stwierdzono zaawansowaną karbonatyzację i zbyt duże stężenie jonów chlorkowych w betonie.

Podsumowanie

Konstrukcje betonowe eksploatowane w niekorzystnych warunkach powinny być odpowiednio zabezpieczone [5]. W analizowanym przypadku, z uwagi na znaczny stopień degradacji stropodachu, **zalecono wykonanie nowej konstrukcji pokrycia dachowego z płyt żelbetowych**. W celu ochrony betonu płyt oraz prętów zbrojeniowych przed korozją należy zabezpieczyć płyty dachowe środkiem do powierzchniowej impregnacji betonu, a następnie wykonać warstwę ochronną z zaprawy cementowo-epoksydowej oraz zabezpieczenie powierzchniowe w postaci elastycznej powłoki, w celu eliminacji wszelkich nieszczelności spowodowanych mikrospekaniem i w strukturze wypraw PCC lub SPCC. Jest to szczególnie ważne w przypadku obiektów poddawanych działaniu wysokiej temperatury oraz obciążeń dynamicznych. Dodatkowo, elastyczna powłoka ochronna stanowi długotrwałą barierę przed oddziaływaniem dwutlenku węgla i innych substancji szkodliwych. Nowe pokrycie stropodachu zaprojektowano w postaci hydroizolacyjnej membrany dachowej. Izolację termiczną przyjęto jako dwuwarstwową. W celu efektywnego wentylowania przestrzeni dachowej, warstwę izolacji termicznej należy ułożyć na blasze posadowionej na krawędziakach drewnianych i ostatecznie zamontować odpowiednio wysokie kominki wentylacyjne (zaproponowano konkretne rozwiązanie techniczne). Prace naprawcze powinny być zaprojektowane i przeprowadzone zgodnie z PN-EN 1504-9 [6].

Literatura

- [1] PN-EN 1992-1-1: 2008P: Eurocod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] Czarniecki L., Emmons P. H., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków 2002.
- [3] Neville A.M., Właściwości betonu, Wyd. Polski Cement, Kraków 2012.
- [4] PN-EN 206-1: 2003P: Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja, zgodność.
- [5] Czarniecki L., Woyciechowski P., Prediction of the reinforced concrete structure durability under the risk of carbonation and chloride aggression. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 61, 173 – 181, 2013.
- [6] Czarniecki L., Łukowski P., Naprawa i ochrona betonu zgodnie z PN-EN 1504. Materiały Budowlane 2/2009.

Otrzymano 06.10.2014 r.