

ZNACZENIE ROZPOZNANIA PROCESÓW DEGRADACJI BETONU W ODNIESIENIU DO OBIEKTÓW INFRASTRUKTURY KOLEJOWEJ

Mirosława Bazarnik

dr inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Zakład Współdziałania Budowli z Podłożem,
tel.: 12 628 2579, e-mail: mbazarnik@pk.edu.pl

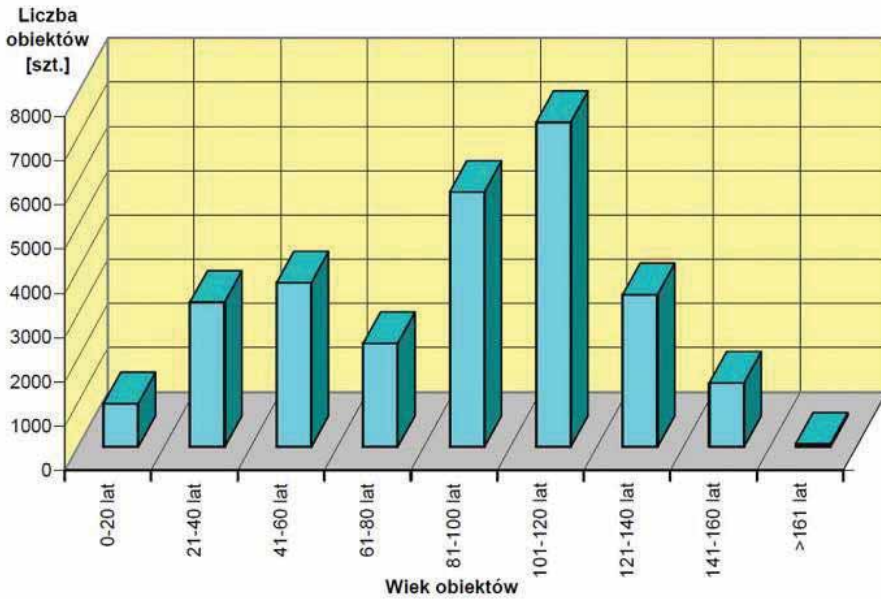
Streszczenie. *Infrastruktura kolejowa w Polsce w wyniku wieloletnich zaniedbań, wymaga szeregu działań naprawczych. Obecnie ma być realizowany Wieloletni Program Inwestycji Kolejowych do roku 2015, który ma wpłynąć na poprawę jakości infrastruktury kolejowej. W celu uniknięcia błędów instytucjonalnych, przyczyniających się do degradacji obiektów należy przeanalizować wpływ warunków środowiskowych na długoterminową integralność i okres użytkowania infrastruktury.*

Słowa kluczowe: *infrastruktura kolejowa, degradacja betonu, korozja siarczanowa*

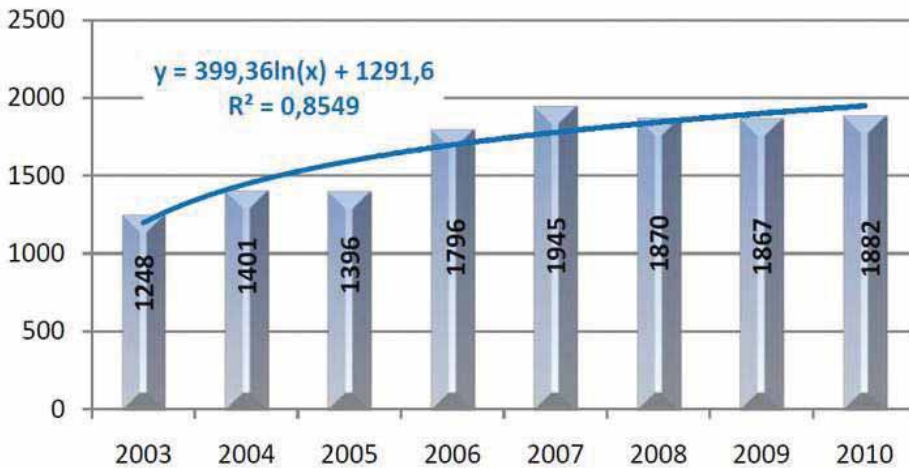
Wprowadzenie

Zgodnie z wieloletnim planem inwestycyjno-kolejowym [6] Spółka PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. zarządza liniami kolejowymi o łącznej długości około 19 187 km, oraz obiektami inżynierskimi takimi jak mosty, wiadukty i przepusty (25 736 szt. o łącznej długości 725 621,9 m). Jak podaje Bień [1], w Polsce obiekty infrastruktury kolejowej to w większości konstrukcje bardzo stare. Około 45% obiektów jest w wieku powyżej 100 lat, a jedynie około 15% konstrukcji – poniżej 40 lat [1] (rys. 1). Najstarsze, istniejące dotąd kolejowe obiekty inżynierskie powstały w Polsce na początku XIX w., a intensywny rozwój sieci kolejowej rozpoczął się na przełomie lat 30. i 40. XX w.

Ocenia się, że w dobrym stanie technicznym znajduje się około 36% linii kolejowych [6]. Fakt ten nie pozostaje bez znaczenia dla eksploatacji. Jak wskazuje Siwowski [5] do 2010 r. aż 1882 kolejowych obiektów inżynierskich (7,4%) wymagało pilnego podjęcia robót utrzymaniowo-naprawczych lub inwestycyjnych w celu przywrócenia im pierwotnych parametrów użytkowych, likwidacji wprowadzonych ograniczeń eksploatacyjnych oraz ograniczenia dalszej degradacji technicznej. Tomasz Siwowski zaprezentował [5] niekorzystne zmiany liczby takich obiektów, na tle ostatnich lat (rys. 2).



Rys. 1. Struktura wiekowa kolejowych obiektów inżynieryjnych w Polsce [1]



Rys. 2. Obiekty inżynieryjne wymagające napraw [5]

Znaczącą liczbę obiektów inżynieryjnych na sieci PLK stanowią przepusty i małe mosty o rozpiętości do 15 m. Większość z nich to obiekty żelbetowe, monolityczne lub prefabrykowane oraz – w przypadku obiektów starszych – mosty sklepione (cegłane lub kamienne). Ze względu na długoletnią eksploatację przy niskim standardzie utrzymania, zdecydowana większość tych obiektów nadaje się do całkowitej przebudowy [5]. Niemniej jednak część obiektów jest odtwarzana przez wymianę zdegradowanego materiału. Zgodnie z przyjętym *Wieloletnim programem*

inwestycji kolejowych do roku 2015 [6] zdecydowana większość zadań ma obejmować modernizację i rewitalizację istniejącej infrastruktury, tylko niewielką część zadań stanowi budowa nowej infrastruktury. Zatem w najbliższej przyszłości duża część nakładów finansowych będzie wydana na naprawę obiektów. Przez wiele lat pomijano kwestie konserwacji i napraw betonu. Taki brak dbałości o infrastrukturę stanowi zagrożenie, ponieważ beton podobnie jak inne materiały budowlane wymaga konserwacji zapobiegawczej (co wpisano między innymi do instrukcji ID-2 określającej warunki techniczne dla kolejowych obiektów inżynieryjnych).

Degradacja konstrukcji betonowych

Elementy betonowe konstrukcji inżynieryjnych narażone są na niszczące oddziaływanie środowisk, w wyniku których ulegają zmianie ich właściwości użytkowe. Beton powszechnie uważany jest za materiał charakteryzujący się dużą wytrzymałością mechaniczną i odpornością na uszkodzenia. Niemniej jednak błędy powstałe na etapie projektowania i wykonywania oraz długotrwałe oddziaływanie szkodliwych czynników znajdujących się w powietrzu i wodzie, a także wpływ wilgoci, karbonatyzacja, krystalizacja soli, cykliczne zamarzanie-odmarzanie oraz przeciążenia konstrukcji – wpływają na rodzaj i stopień zniszczeń struktury betonu.

Sprawna naprawa elementów betonowych to proces wymagający podejmowania wielu ważnych decyzji dotyczących materiałów i warunków wykonania. Chociaż skutki procesu degradacji często widać dopiero po latach, skala uszkodzeń zwiększa się z czasem w tempie geometrycznym, co w rezultacie sprawia, że im później wykonuje się naprawy, tym większy jest ich koszt. Niebezpieczeństwo związane z usuwaniem szkód polega na tym, że same naprawy, zamiast stanowić rozwiązanie, stają się częścią kosztownego, niekończącego się cyklu napraw. Aby uniknąć błędnego koła, istotne jest zrozumienie i ustalenie przyczyn degradacji betonu. Merytoryczny problem stanowi opracowanie prognozowania zmian jakościowych betonu i zbrojenia w zależności od warunków środowiskowych, w których znajduje się konstrukcja. Pomoże to w zapewnieniu bezpieczeństwa i trwałości konstrukcji. Wiedza ta będzie stanowić podstawę do oszacowania, kiedy dany budynek czy instalacja kwalifikują się do remontu. Wykonanie analizy wpływu czynników środowiskowych może mieć zatem kluczowe znaczenie przy realizacji prac remontowych, rekonstrukcyjnych, renowacji, rewitalizacji, przebudowach, nadbudowach, a także przy wznawianiu budowy niedokończonych obiektów. Jednocześnie należy pamiętać, że błędne określenie przyczyn korozji, stosowanie niesprawdzonych, czy też przypadkowych materiałów, może przyspieszyć degradację konstrukcji, co naraża inwestora na konieczność wykonania ponownej naprawy i znacznie zwiększa koszty inwestycji.

Istnieje wiele zmiennych, które mogą wpływać na wytrzymałość betonu takich jak: bliskość cieków wodnych, względna wielkość ziaren kruszywa i jego powierzchnia właściwa.

Specjaliści [4] wskazują na kilka grup przyczyn wpływających na uszkodzenia i zniszczenia betonu, do których należą:

- przyczyny mechaniczne, takie jak np. uderzenie, przeciążenie, ścieranie, wibracje;
- przyczyny fizyczne, np. wpływ wysokiej temperatury i efekty związane z różnymi współczynnikami rozszerzalności cieplnej kruszywa i stwardniałego zaczynu cementowego;
- cykliczne zamrażanie i rozmrażanie; woda zawarta w porach kapilarnych zamarza i wywiera ciśnienie na otaczające ją ścianki porów, co może prowadzić do mikropęknięć;
- przyczyny chemiczne, takie jak: działanie agresywnych jonów, wody miękkiej, kwasów oraz wody morskiej.

Należy zaznaczyć, że w sytuacji rzeczywistej, na uszkodzenia konstrukcji budowlanej, wpływa wiele czynników jednocześnie np.: korozja siarczanowa wzmaga skutki uszkodzenia wywołanego cyklami zamrażania i rozmrażania.

W analizach zdegradowanych struktur betonowych często pomija się aspekt chemicznych uszkodzeń jako mniej istotnych ze względu na długoletni brak zewnętrznych oznak zniszczeń. Takie zaniedbanie stanowi istotny błąd, ponieważ ze względu na swój charakter chemiczny i mineralogiczny, beton w środowisku naturalnym nie znajduje się w stanie równowagi. Jak wskazują Menendez i inni [3], cement jest reaktywny i niestabilny praktycznie we wszystkich środowiskach. Ta metastabilność i zachodzące reakcje są powszechnie obserwowane i nie stanowią wyjątku. W niektórych przypadkach produkty agresji są łagodne: a zatem proporcje mechaniczne i trwałość szkieletu pozostaje nienaruszona. Przykładem może być zwykły beton niezbrojony, podlegający jedynie procesom karbonatyzacji nie wpływającym istotnie na parametry wytrzymałościowe. Niestety pozostałe procesy jakim podlegają struktury betonowe mogą znacznie bardziej szkodzić i tak np. korozja siarczanowa, której często towarzyszy ekspansja objętościowa, która w konsekwencji prowadzi do powstania mikro-spękań i proces degradacji staje się samo-przyspieszający, powodując wzrost ilości spękań i odprysków.

W podstawowym składzie zazwyczaj mieszanka betonowa zawiera 10–15% cementu, 60–75% kruszywa oraz 15–20% wody. W wielu betonach powietrze może stanowić kolejne 5–8%. Często spotykanym składem standardowym jest 11% cementu portlandzkiego, 41% żwiru lub tłuczonych kamieni, 26% piasku, 16% wody i 6% powietrza. Niekiedy dodawane są inne domieszki np. superplastyfikatory.

Beton jest zatem wielofazowym, porowatym materiałem. Wartość pH roztworu między-porowego wynosi około 13, a więc jest znacznie wyższa niż wartość pH otoczenia. Charakterystyka szkieletu porowego, wielkość, a w szczególności połączenia kapilarne porów, determinują przepływ agresywnych jonów wewnątrz matrycy betonowej [3]. Dyfuzja i przenikanie stanowią dwa podstawowe mechanizmy tego przepływu, które dominują w środowisku zawodnionym. Niemniej jednak natura chemiczna szkieletu stanowi kluczowy parametr odporności betonu na agresywne środowiska.

Chemiczna kompozycja fazy zhydratyzowanej dla cementu portlandzkiego oraz jego proporcje wewnątrz szkieletu zależą od rodzaju wiązań tworzących się pomiędzy cementem a dodatkami. Co dodatkowo determinuje chemiczną stabilizację szkieletu.

Woda gra kluczową rolę w interakcji pomiędzy cementowym szkieletem a agresywnym medium.

Główną siłą napędzającą stanowią reakcje chemiczne dwojakiego typu: rozpuszczanie zhydratyzowanej i niezhydratyzowanej fazy oraz wytrącanie nowej fazy – nowych produktów reakcji. Te reakcje z reguły początkowo zachodzą na zewnętrznej powierzchni betonu, a następnie wraz z upływem czasu następuje ekspansja w głąb prowadząc do powstania w procesie strefy zmienionej. Właściwości strefy zmienionej są generalnie zubożone (fizycznie, a szczególnie mechanicznie) w porównaniu ze zdrową częścią. Ponadto formowanie się nowych produktów może w niektórych przypadkach wywoływać dodatkowe skutki szkodliwe w szkielecie.

Ciśnienie wywołane przez krystalizację np. soli może wywoływać serię mikrospękań, zmieniając tym samym nie tylko mechaniczne proporcje szkieletu ale zwiększając również właściwości transportowe, indukując wyższą kinetykę wnikania agresywnych roztworów w głąb struktury. Niekiedy docierając do zbrojenia powodują destrukcję struktury (rys. 3.).



Rys.3. Ciąg przyczynowo skutkowy degradacji betonu [7]

Jest to generalny mechanizm interakcji między zewnętrznymi centrami a szkieletem cementowym. Rodzaj zniszczeń wywołanych atakiem agresywnych związków jest silnie uzależniony od charakteru komponentów agresywnych.

Grattan–Bellew [2] wyróżnia następujące rodzaje uszkodzeń betonu wywołanych czynnikami chemicznymi:

- uszkodzenie wskutek oddziaływania wody miękkiej. Woda miękka (o pH najczęściej z zakresu 5-6,5) działając na beton prowadzi do wypłukiwania wodorotlenku wapnia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Rezultatem tego jest utrata masy betonu i osłabienie wiązania cementowego C-S-H;
- uszkodzenie wskutek kontaktu betonu z wodą morską. Woda morska zawiera około 3% NaCl, 0,3% MgCl_2 , 0,2% MgSO_4 i śladowe ilości KHCO_3 . Największe zagrożenie dla konstrukcji betonowych narażonych na kontakt z wodą morską stanowią zawarte w niej chlorki i siarczany sodu i magnezu. Atak wody morskiej powoduje erozję oraz wypłukiwanie składników betonu. Wodorotlenek wapnia i siarczan wapnia są w dużym stopniu roz-

puszczane w wodzie morskiej, a to zwiększa efekty ługowania. Dodatkowo kontakt z wodą morską prowadzi do korozji zbrojenia. Nagromadzenie produktów korozji stali, powoduje z kolei rozzerwanie otaczającego betonu. Zatem wpływ wody morskiej jest znacznie bardziej negatywny dla żelbetu niż dla zwykłego betonu;

- uszkodzenie betonu wskutek działania kwasów. Wodorotlenek wapnia zawarty w cemencie portlandzkim w ilości ok. 20% całkowicie rozpuszcza się nawet pod wpływem słabych kwasów organicznych. Obecne w powietrzu SO_2 i CO_2 tworzą w kontakcie z wodą słabe kwasy, które mogą reagować z węglanem wapnia, tym samym powodując pogorszenie wytrzymałości betonu. W praktyce, atak kwasu występuje przy wartości pH poniżej około 6,5. Przy pH poniżej 5,5 atak może być poważny w skutkach. Jeżeli kwasy lub ich sole penetrują w głąb betonu docierając do stali może dojść do korozji zbrojenia;
- uszkodzenie betonu wskutek korozji siarczanowej. Jest to jeden z najbardziej niebezpiecznych rodzajów chemicznej korozji betonu, gdyż może prowadzić zarówno do rozpadu wiązań chemicznych, jak i ekspansji elementów konstrukcji, mikropęknięć, a nawet do całkowitego zniszczenia skorodowanego elementu konstrukcji. Siarczany wapnia, sodu, potasu i magnezu są obecne w większości gleb i wód gruntowych. Siarczany reagują z wolnym wodorotlenkiem wapnia [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], tworząc siarczan wapnia (gips) oraz reagują z wodorotlenkiem glinu tworząc uwodniony siarczanoglinian wapnia, którego objętość wynosi około 117% objętości materiału wyjściowego. Produkty tych reakcji, gips i uwodniony siarczanoglinian wapnia mają znacznie większą objętość niż związki, które zastępują. Wynika z tego, że reakcje z siarczanami prowadzą do ekspansji betonu. Spośród wszystkich siarczanów, siarczan magnezu powoduje największe uszkodzenia betonu;
- uszkodzenia betonu wskutek korozji chlorkowej. Ze względu na wysoką alkaliczność warstwy ochronnej otuliny betonowej w konstrukcji żelbetowej działanie chlorków jest szczególnie niebezpieczne. Przyczynia się do korozji zbrojenia. Źródłem chlorków może być: cement, woda, domieszki, kruszywo oraz otoczenie zewnętrzne. Wnikanie chlorków w otulinę betonową niesie ze sobą ryzyko korozji osadzonego metalu. Im wyższa zawartość chlorków, tym większe jest ryzyko wystąpienia korozji. Aby zminimalizować ryzyko degradacji betonu należy ograniczyć zawartość szkodliwych soli pochodzących z cementu, kruszywa, wody i domieszek.

Podsumowanie

Beton podobnie jak inne materiały budowlane narażony jest na niszczące oddziaływanie środowisk w wyniku których ulegają zmianie jego właściwości użytkowe. Dlatego obecnie rozwój technologii produkcji betonu ukierunkowany jest przede

wszystkim na uzyskanie betonów zapewniających utrzymanie właściwości związanych z trwałością na wymaganym projektowanym poziomie. Trwałość obiektów budowlanych została wpisana do wymagań podstawowych dyrektywy europejskiej 89/106/ECC i Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady Europy, ustanawiającego zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i jest traktowana jako ważny element zrównoważonego rozwoju.

Na podstawie zewnętrznych symptomów degradacji, nie zawsze można prawidłowo ocenić przyczyny i wyjaśnić złożoność zagadnienia. Czasem niezbędne jest przeprowadzenie badań laboratoryjnych mających na celu wyjaśnienie problemu. Beton narażony jest na ataki czynników środowiskowych niemalże od momentu powstania budowli, a proces degradacji zachodzi wewnątrz i w sposób ciągły. Pierwsze małe pęknięcie wpuszcza do środka wodę oraz inne substancje powodując korozję. Kolejnym etapem jest pojawienie się symptomów zewnętrznych, takich jak wykruszanie, pękanie czy odpryskiwanie. Dbłość o zachowanie procedur konserwacyjnych i odpowiednią reakcję na oznaki degradacji, jest niezmiernie ważne dla zapewnienia bezpieczeństwa i trwałości konstrukcji.

Bibliografia

- [1] Bień J., Mosty kolejowe – uszkodzenia, awarie, katastrofy. Materiały XXIV Konferencji Naukowo-Technicznej „Awarie budowlane”. Szczecin-Międzyzdroje, 26–29 maja 2009 r., s.45–62.
- [2] Grattan-Bellew P.E. (1996), Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes. *Constructions and Building Materials*, 10: 3-16.
- [3] Menendez E., Matschei T., Glasser F.P., Sulfate Attack of Concrete in Performance of Cement-Based. *Materials in Aggressive Aqueous Environments 2013* Springer.
- [4] Neville A.M. (2000), Właściwości betonu, Polski Cement.
- [5] Siwowski T., Nowoczesne technologie modernizacji kolejowych obiektów inżynierskich. *Technika* 2013, str. 36-42.
- [6] Wieloletni program inwestycji kolejowych do roku 2015. Infrastruktura kolejowa zarządzana przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Minister Infrastruktury, 5.11.2013 r.}
- [7] <http://cpt.markupfactory.com/corrosion-process>