

Typowe procesy degradacji i uszkodzenia żelbetowych obiektów mostowych

Characteristic degradation processes and defects of reinforced concrete bridges



Jan Bień

Prof. dr hab. inż

Politechnika Wroclawska, Wydział
Budownictwa Lądowego i
Wodnego

jan.bien@pwr.edu.pl

Streszczenie: Jednoznaczna identyfikacja procesów degradacji oraz wywołanych przez nie uszkodzeń stanowi bardzo ważny element diagnostyki obiektów mostowych, a w efekcie ma fundamentalny wpływ na skuteczne zarządzanie utrzymaniem i eksploatacją infrastruktury transportowej. W pracy przedstawiono przegląd zjawisk degradacyjnych charakterystycznych dla żelbetowych obiektów mostowych, a także zaprezentowano klasyfikację stymulatorów degradacji oraz mechanizmów degradacji tworzących procesy degradacyjne, z pokazaniem ich wzajemnych uwarunkowań. Przedstawiono również charakterystyki typowych procesów degradacji, stanowiących zazwyczaj kombinacje dwóch lub więcej mechanizmów degradacji. Zaproponowano hierarchiczną wielopoziomową klasyfikację uszkodzeń żelbetowych konstrukcji mostowych, a także pokazano relacje między najczęściej występującymi mechanizmami degradacji a uszkodzeniami należącymi do poszczególnych klas.

Słowa kluczowe: Mosty żelbetowe; Stymulatory degradacji; Mechanizmy degradacji; Procesy degradacji; Uszkodzenia

Abstract: The unambiguous identification of degradation processes and the damage they cause is a very important part of the diagnostics of bridge facilities and, as a result, has a fundamental impact on the efficient management of the maintenance and operation of transport infrastructure. The paper provides an overview of the degradation phenomena characteristic for reinforced concrete bridges, as well as a classification of degradation stimulators and degradation mechanisms showing their mutual conditions. The characteristics of typical degradation processes, usually combinations of two or more degradation mechanisms, are also presented. A hierarchical multi-level classification of damage to the bridge structure type concerned was proposed, as well as the relationship between the most common degradation mechanisms and class-specific damage was shown.

Keywords: Reinforced concrete bridges; Degradation stimulators; Degradation mechanisms; Degradation processes, Damage

Wstęp

Skuteczne zarządzanie eksploatacją i utrzymaniem infrastruktury transportowej, w tym w szczególności infrastruktury mostowej, wymaga bieżącego monitorowania kondycji obiektów. Decyzje muszą być podejmowane w ciągu całego okresu eksploatacji obiektu mostowego, a ich rodzaj i zakres zależy od obowiązujących przepisów oraz od aktualnej kondycji obiektu. Podstawę oceny kondycji stanowią rezultaty systematycznych działań diagnostycznych obejmujących przeglądy i różnego typu badania, których celem jest

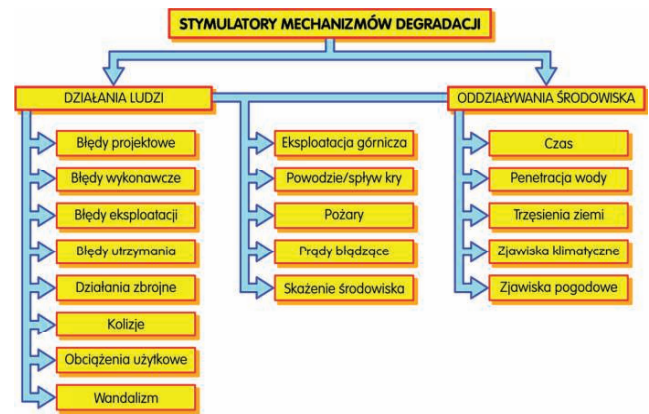
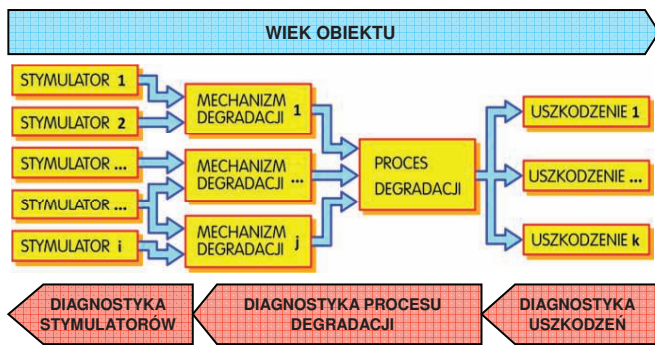
wykrycie oraz jakościowa i ilościowa identyfikacja ewentualnych uszkodzeń obiektu oraz procesów degradacji powodujących te uszkodzenia [1]-[3].

Proces degradacji może być zdefiniowany jako czynnik powodujący pogorszenie się kondycji obiektu wynikające z aktywności mechanizmu lub mechanizmów degradacji, gdzie mechanizmem degradacji może być zjawisko fizyczne, chemiczne lub biologiczne powodujące powstanie uszkodzenia lub uszkodzeń obiektu. Za inicjację, sposób przebiegu i szybkość rozwoju procesów degradacji odpowiadają czynniki, które można

ogólnie określić jako stymulatory degradacji. Stymulatory te aktywują mechanizmy składające się na ostateczną postać procesu degradacji obiektu mostowego, a działając w trakcie procesu degradacji – wpływają na jego przebieg. Powiązania stymulatorów, mechanizmów i procesów degradacji z uszkodzeniami przedstawiono schematycznie na rys. 1.

W diagnostyce obiektów mostowych, można wyróżnić trzy poziomy szczególności, pokazane na rys. 1:

- diagnostykę uszkodzeń – obejmującą wykrywanie i identyfikację uszkodzeń obiektu, z określe-



1. Komponenty zjawisk degradacyjnych powodujących uszkodzenia obiektów mostowych oraz procedury diagnostyczne

2. Podstawowe czynniki stymulujące mechanizmy degradacji obiektów mostowych [2]

niem ich lokalizacji, rozległości i środowiska. intensywności,

- diagnostykę procesu degradacji – zajmującą się identyfikacją mechanizmów degradacji tworzących proces degradacji,
- diagnostykę stymulatorów degradacji – ukierunkowaną na określenie czynników wpływających na inicjację i przebieg zjawisk degradacyjnych.

Przykładami wpływu łącznego działania ludzi i oddziaływań środowiska na zjawiska degradacji mogą być niektóre typy pożarów, skażenia środowiska lub wpływów eksploatacji górniczej, które są z reguły inicjowane działaniami ludzi, ale na obiekty mostowe oddziałują przez zmiany ich warunków środowiskowych.

- mechanizmy biologiczne, związane z oddziaływaniem czynników biologicznych na obiekty mostowe.

Kompleksowe działania diagnostyczne powinny obejmować wszystkie trzy wymienione wyżej poziomy szczegółowości, ale w praktyce uzyskanie satysfakcjonujących rezultatów we wszystkich obszarach jest trudne. Wynika to z dużej złożoności występujących zjawisk degradacyjnych.

Degradacja obiektów mostowych

Stymulatory degradacji

Stymulatory występujące najczęściej i mające najistotniejszy wpływ na kształtowanie mechanizmów oraz procesów degradacji obiektów mostowych, można podzielić na (rys. 2):

- stymulatory związane z działaniami ludzi,
- stymulatory związane z ogólnie rozumianymi oddziaływaniami środowiska,
- stymulatory powiązane częściowo z aktywnością ludzi, a częściowo wynikające z oddziaływań

Mechanizmy degradacji

Najczęściej występujące mechanizmy degradacji obiektów mostowych zestawiono na rys. 3.

Mechanizmy degradacji są aktywizowane przez stymulatory, które wpływają również na przebieg oraz intensywność zjawisk degradacyjnych, a o ostatecznej postaci przebiegu degradacji obiektu mostowego decyduje z reguły kombinacja aktywnych mechanizmów degradacji (patrz rys. 1) kształtujących indywidualny proces degradacji, specyficzny dla każdego obiektu.

Z punktu widzenia natury zjawisk degradacyjnych można wyróżnić trzy podstawowe grupy mechanizmów degradacji występujących w obiektach mostowych (rys. 3):

- mechanizmy chemiczne, powodujące degradację obiektu w wyniku reakcji chemicznych,
- mechanizmy fizyczne, prowadzące do uszkodzeń w rezultacie zjawisk fizycznych,

Fizyczne mechanizmy degradacji

Zjawiska fizyczne tworzą największy zespół mechanizmów przyczyniających się do degradacji budowli mostowych. W odniesieniu do żelbetonowych obiektów mostowych istotne znaczenie mają potencjalnie wszystkie wymienione w zestawieniu fizyczne mechanizmy degradacji, a ich powiązania z poszczególnymi stymulatorami przedstawiono w tab. 1.

Fizyczne mechanizmy degradacji stanowią największą grupę wśród mechanizmów oddziaływujących na żelbetonowe obiekty mostowe – na rys. 3 wyróżniono 12 najczęściej spotykanych. Poszczególne mechanizmy są szczegółowo scharakteryzowane m. in. w pracach [2], [4]-[16].

Chemiczne mechanizmy degradacji

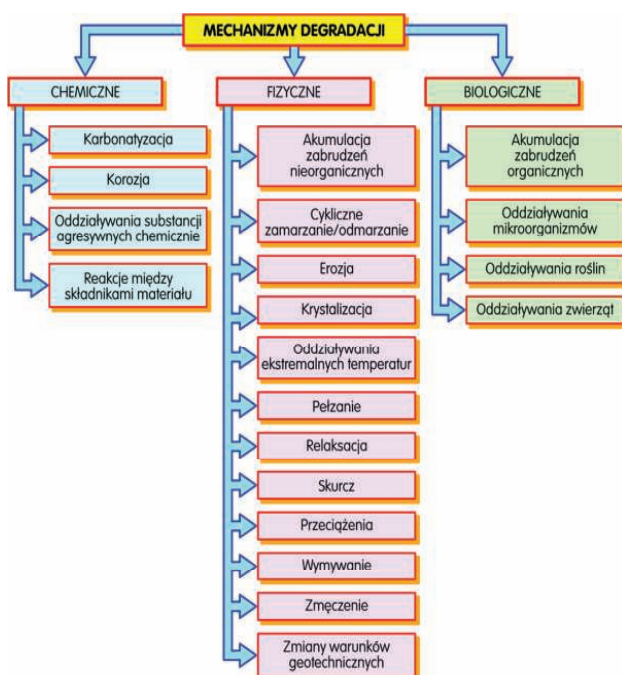
Na rys. 3 wyróżniono cztery grupy chemicznych mechanizmów degradacji, a ich wrażliwość na oddziaływania stymulatorów degradacji zaprezentowano w tab. 2. W konstrukcjach żelbetonowych jednym z podstawowych chemicznych mechanizmów degradacji obiektów mostowych jest karbonatyzacja (uwęglanowanie) betonu [4], [5], [7], [8], [17], [18], [19].

Mechanizm ten jest związany z obecnością w wodzie aktywnych gazów i jonów, przede wszystkim dwutlenku węgla, który tworzy z wodą roztwór słabego kwasu węglowego. Reakcja zawartego w betonie wodorotlenku wapnia z kwasem węglowym prowadzi do powstania węglanu wapnia, a w efekcie powoduje obniżanie wartości pH i ochronnych właściwości betonowej otuliny zbrojenia elementów.

Powszechnie występującym i bardzo groźnym mechanizmem degradacji dotyczącym stalowych komponentów konstrukcji z betonu zbrojonego jest korozja [2], [5], [10], [14], [20]-[23], czyli rozpoczynające się od powierzchni i postępujące w głąb niszczenie metali powodowane działaniem czynników zewnętrznych.

Kolejną grupę mechanizmów degradacji tworzą oddziaływania substancji agresywnych chemicznie (np. [13], [24]), powodujące reakcje między zewnętrznymi działającymi substancjami czynnymi chemicznie, takimi jak: kwasy, zasady, sole, tłuszcze itp. a tworzywem obiektu.

Ostatnia duża grupa chemicznych mechanizmów degradacji obejmuje



3. Klasyfikacja podstawowych mechanizmów degradacji obiektów mostowych [2]

Tab. 1. Stymulatory a fizyczne mechanizmy degradacji obiektów mostowych

Stymulatory mechanizmów degradacji		Fizyczne mechanizmy degradacji											
		Akumulacja zabrudzeń nieorganicznych	Zamarzanie i odmarzanie	Erozja	Krystalizacja	Ekstremalne temperatury	Pełzanie	Relaksacja	Skurcz	Przeciążenia	Wymywanie	Zmęczenie	Zmiany warunków geotechnicznych
Działania ludzi	Błędy projektowe	●	○	○	○		○	○	●	○	●	●	○
	Błędy wykonawcze	○	○						●	○	●	○	○
	Błędy eksploatacji	○								●		○	
	Błędy utrzymania	●		○	○	○				○	○		○
	Działania zbrojne	○				●				●			
	Eksploatacja górnicza			○						●			●
	Kolizje	○				○				●			
	Obciążenia użytkowe											●	○
	Wandalizm	●		○		○				○			
Oddziaływania środowiska	Czas	○	●	●	●		●	●	●		●	●	●
	Penetracja wody	●	●	○	○						●	●	○
	Powodzie/spływ kry	○		●						●	●		●
	Pożary	○				●				○			
	Skażenie środowiska	●									○		
	Trzęsienia ziemi			○						●		○	●
	Zjawiska klimatyczne		●	●							○		○
	Zjawiska pogodowe	○	○	○		●	○		○		●	○	○

Oznaczenia: ● – stymulator podstawowy; ○ – stymulator dodatkowy

reakcje między składnikami materiału elementów obiektu mostowego. Są to najczęściej mechanizmy powodujące degradację elementów betonowych w wyniku reakcji chemicznych między ziarnami kruszywa a matrycą cementową w efekcie nie właściwego doboru składu materiału

(np. [16], [18]). Do grupy tej należy zaliczyć także reakcje fotochemiczne – inicjowane światłem słonecznym – powodujące np. zmiany barwy (płowienie, blaknięcie lub ciemnienie) powłok znajdujących się na elementach konstrukcyjnych.

Tab. 2. Stymulatory a chemiczne mechanizmy degradacji obiektów mostowych

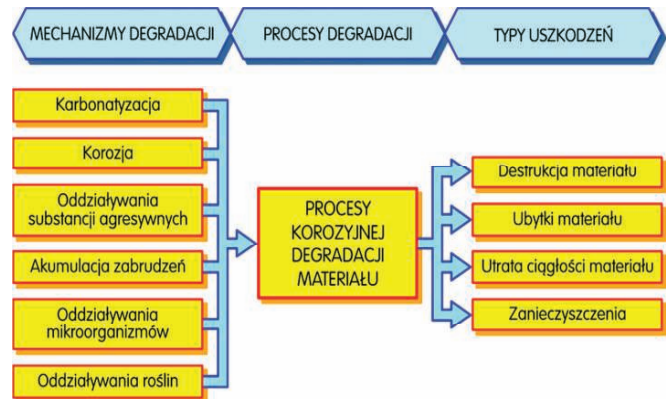
Stymulatory mechanizmów degradacji		Chemiczne mechanizmy degradacji				
		Karbonatyzacja	Korozja	Oddziaływania substancji agresywnych	Reakcje między składnikami materiału	
Działania ludzi	Błędy projektowe	○	●	○	○	
	Błędy wykonawcze	○	●	○	●	
	Błędy eksploatacji		○	○		
	Błędy utrzymania	○	●	○		
	Kolizje		○			
	Prądy błądzące		●			
	Wandalizm		○	○		
	Oddziaływania środowiska	Czas	●	●	●	●
		Penetracja wody	○	●	●	○
Powodzie/spływ kry				○		
Pożary			○			
Skażenie środowiska		●	●	●	○	
Zjawiska klimatyczne		○	○	○	○	
Zjawiska pogodowe		○	○	○	○	

Oznaczenia: ● – stymulator podstawowy, ○ – stymulator dodatkowy

Tab. 3. Stymulatory a biologiczne mechanizmy degradacji obiektów mostowych

Stymulatory mechanizmów degradacji		Biologiczne mechanizmy degradacji			
		Akumulacja zabrudzeń organicznych	Oddziaływanie mikroorganizmów	Oddziaływanie roślin	Oddziaływanie zwierząt
Działania ludzi	Błędy projektowe	●	●	●	●
	Błędy wykonawcze	○	○	○	○
	Błędy utrzymania	●	●	●	●
	Wandalizm	○			
Oddziaływanie środowiska	Czas	●	●	●	○
	Penetracja wody	○	○	○	
	Powodzie/spyw kry	●			
	Skażenie środowiska	○	○	○	○
	Zjawiska klimatyczne		○	○	○
	Zjawiska pogodowe	○	○	○	

Oznaczenia: ● – stymulator podstawowy; ○ – stymulator dodatkowy



4. Podstawowe mechanizmy związane z procesami korozyjnej degradacji żelbetowych konstrukcji mostowych oraz charakterystyczne typy uszkodzeń [2]

Biologiczne mechanizmy degradacji

Zjawiska degradacji biologicznej, nazywanej też biodeteriacją, można zgodnie z [25], [26] określić jako niepożądane zmiany właściwości materiału spowodowane aktywnością żywych organizmów. Biodeteriacja ma stosunkowo ograniczony, ale w wielu sytuacjach trudny do pominięcia, wpływ na żelbetowe obiekty mostowe. Cztery podstawowe typy mechanizmów degradacji związanych z wpływem czynników biologicznych przedstawiono na rys. 3, gdzie wyróżniono: akumulację zabrudzeń organicznych, oddziaływanie mikroorganizmów, oddziaływanie roślin oraz oddziaływanie zwierząt.

Zależności między biologicznymi mechanizmami degradacji a ich stymulatorami zaprezentowano w tab. 3. Zjawiska zachodzące w efekcie działania czynników biologicznych na obiekty mostowe można generalnie podzielić na następujące grupy [27]:

- oddziaływanie mechaniczne, polegające na bezpośrednim działaniu organizmów na elementy obiektu, np. przemieszczenia elementów murowych w wyniku penetracji korzeni roślin w głąb spoin, ubytki materiału spowodowane przez gryzonie,



5. Charakterystyczne skutki procesów korozyjnej degradacji konstrukcji żelbetowych: a) zarysowania otuliny i wycieki produktów korozji zbrojenia, b) pęknięcia i odspojenie otuliny, c) ubytki otuliny i odsłonięcie prętów zbrojenia, d) ubytki materiału prętów zbrojenia prowadzące do przerwania ich ciągliwości

- chemiczna biodeteriacja asymilacyjna – powodowana wykorzystaniem przez organizmy żywe materiałów obiektu jako substancji odżywczej,
- chemiczna biodeteriacja dysymilacyjna – w wyniku szkodliwego oddziaływania metabolitów organizmów żywych na elementy obiektu mostowego,
- gromadzenie się organizmów żywych na powierzchni obiektu,

powodujące pogorszenie jego warunków pracy (np. utrzymywanie zwiększonej wilgotności), wyglądu, a często także walorów użytkowych (np. ograniczenie możliwości przemieszczeń łożysk).

Tab. 4. Wpływ wartości pH betonu na jego właściwości ochronne w stosunku do zbrojenia [10], [28]

Wartość pH betonu	Efektywność antykorozyjnej ochrony zbrojenia
13,5-11,8	Pełna ochrona zbrojenia, beton nieskarbonatyzowany
11,8-11,0	Początkowa faza obniżania właściwości ochronnych betonu
11,0-10,0	Dalsza utrata właściwości ochronnych i zagrożenie inicjacją korozji zbrojenia
≤ 10,0	Znaczna utrata właściwości ochronnych betonu, inicjacja i rozwój procesu korozji zbrojenia
≤ 9,0	Brak właściwości ochronnych betonu, zaawansowana korozja zbrojenia

Charakterystyczne procesy degradacji żelbetowych obiektów mostowych

Procesy korozyjnej degradacji materiału

Procesy korozyjnej degradacji materiału to zjawiska dominujące w odniesieniu do konstrukcji z betonu zbrojonego, związane z korozją zbrojenia powodującą destrukcję, ubytki, utratę ciągłości materiału, a także często prowadzącą do zanieczyszczenia elementów konstrukcji produktami korozji (rys. 4). W procesach korozyjnej degradacji konstrukcji z betonu zbrojonego (rys. 5) mechanizm korozji jest z reguły związany ze zjawiskiem karbonatyzacji, czy też ogólniej – zubożniania betonu oraz z oddziaływaniami innych substancji agresywnych chemicznie (chlor-

ki, siarczany, azotany itp.). Wpływ na przebieg zjawisk korozyjnych może mieć także ewentualna akumulacja zanieczyszczeń oraz oddziaływanie mechanizmów biologicznych (mikroorganizmów, roślin) wpływające przede wszystkim na utrzymywanie się długotrwałego zawilgocenia konstrukcji, co przyspiesza i intensyfikuje przebieg procesów korozyjnych. Podstawowymi mechanizmami prowadzącymi do aktywacji procesu korozyjnej degradacji konstrukcji mostowych z betonu zbrojonego są: wnikanie zawartego w powietrzu dwutlenku węgla CO₂, penetracja jonów chlorkowych Cl⁻ najczęściej związana z używaniem chlorku sodu NaCl do zimowego utrzymania nawierzchni drogowych, a także wnikanie wody w głąb betonu.

Proces degradacji korozyjnej, postępujący od powierzchni w głąb elementu, powoduje stopniową karbonatyzację (uwęglanowanie) zewnętrznych warstw betonu, a w efekcie obniżanie wartości pH i ochronnych właściwości betonowej otuliny. Charakterystyczne zakresy wartości pH betonu w powiązaniu z jego efektywnością ochronną w stosunku do zbrojenia przedstawiono w tab. 4. Obniżenie wartości pH do 10 stwarza warunki do zapoczątkowania procesu korozji zbrojenia, a pH ≤ 9 świadczy o pełnej karbonatyzacji betonu i utracie właściwości ochronnych otuliny (np. [10], [28], [29]). W

kolejnych fazach procesu korozyjnej degradacji pojawiają się zarysowania (rys. 5a), pęknięcia (rys. 5b), lokalne ubytki otuliny betonowej (rys. 5c), a w skrajnym przypadku – ubytki materiału prętów zbrojenia prowadzące do ich przzerwania (rys. 5d).

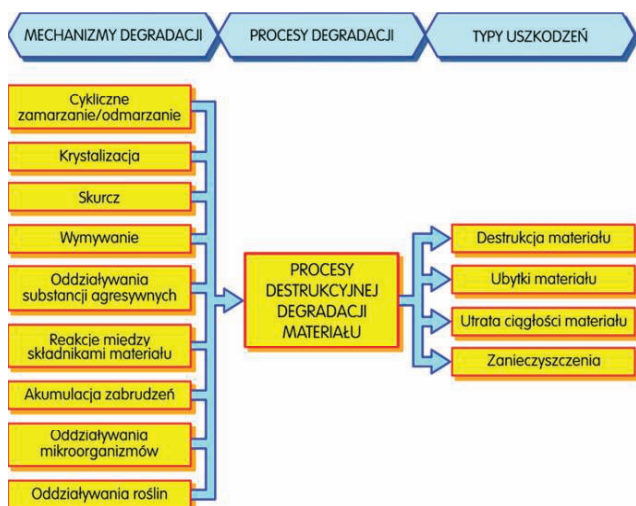
Produkty korozji prętów zbrojenia są mieszaniną różnych związków chemicznych, których objętość może być znacznie, nawet ponad pięciokrotnie (tab. 4), większa niż objętość stali z której powstały [5], [30], co przyczynia się do przyspieszonej destrukcji betonu otuliny.

Procesy destrukcyjnej degradacji materiału

Procesy destrukcyjnej degradacji materiału powodują pogorszenie właściwości fizycznych lub chemicznych betonu, a także utratę ciągłości oraz ubytki betonu w wyniku oddziaływania, innych niż korozja, czynników zewnętrznych i procesów zachodzą-

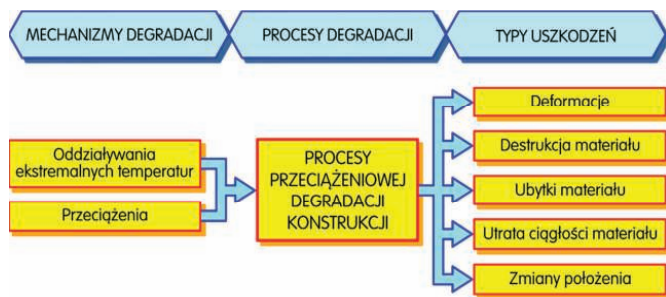
Tab. 5. Wpływ zmian temperatury wody na ciśnienie w porach betonu [30]

Temperatura wody	Wytworzone ciśnienie
+4 oC	0
0 oC	10 MPa
-5 oC	61 MPa
-10 oC	113 MPa
-15 oC	159 MPa
-20 oC	205 MPa
-22 oC	211,5 MPa



7. Przykłady efektów destrukcyjnej degradacji materiału: zarysowania i destrukcja betonu spowodowane cyklicznym zamarzaniem/odmarzaniem wody i wymywaniem składników betonu (po lewej) oraz skurczem betonu (po prawej)

6. Podstawowe mechanizmy związane z procesami destrukcyjnej degradacji żelbetowych konstrukcji mostowych oraz charakterystyczne typy uszkodzeń [2]



8. Podstawowe mechanizmy związane z procesami przeciążeniowej degradacji betonowych konstrukcji mostowych oraz charakterystyczne typy uszkodzeń [2]

9. Deformacje oraz ubytki i utrata ciągliwości materiału elementów żelbetonowej konstrukcji mostowej na skutek przeciążeń wywołanych uderzeniami pojazdów o ponadnormatywnych wymiarach



10. Deformacje w postaci: nieprawidłowej geometrii konstrukcji (po lewej) oraz zmiany geometrii osi elementu - trwałe wygięcie konstrukcji przęsła (po prawej)



11. Destrukcja betonu i stali prętów zbrojenia w postaci pogorszenia cech chemicznych i fizycznych materiałów – występująca równocześnie z ubytkami materiału

cych w materiale (rys. 6). Istotne znaczenie mają tu mechanizmy o charakterze fizycznym, a w szczególności cykliczne zamarzanie i odmarzanie wody w porach betonu, tworzenie się i wzrost kryształów oraz skurcz betonu powodujące powstawanie wewnętrznych naprężeń w materiale, procesy reologiczne, a także wymywanie rozpuszczalnych składników betonu w wyniku penetracji wody.

Destrukcja betonu może być także skutkiem działania chemicznych mechanizmów degradacji, które najczęściej mają postać reakcji między składnikami betonu lub reakcji między betonem a substancjami agresywnymi działającymi z zewnątrz. Czynniki destrukcyjne mogą być również związane z mechanizmami o podłożu biologicznym, takimi jak oddziaływania mikroorganizmów lub roślin czy też akumulacja zabrudzeń o charakterze organicznym. Efektem działania mechanizmów tworzących złożone, z reguły, procesy degradacji są uszkodzenia w postaci destrukcji betonu, a w bardziej zaawansowanych stadiach procesu także w postaci ubytków czy utraty ciągliwości

materiału.

Wśród fizycznych mechanizmów degradacji szczególne znaczenie dla procesów destrukcyjnych konstrukcji żelbetonowych ma cykliczne zamarzanie i odmarzanie wody znajdującej się w betonie. Wzrost objętości wody zamarzającej w porach betonu może powodować powstawanie znacznych dodatkowych naprężeń w materiale (tab. 5), prowadzących do uszkodzeń jego struktury i powodujących w efekcie obniżenie wytrzymałości, lokalną utratę ciągliwości oraz ubytki materiału (rys. 7). Zmiana temperatury od +4 °C do 0 °C powoduje wzrost objętości zamarzającej wody o około 9%, a spadek temperatury do -22 °C wywołuje zwiększenie wyjściowej objętości o 13.2%. Ten mechanizm degradacji jest szczególnie aktywny w strefach klimatu umiarkowanego, gdzie w ciągu roku występuje wiele cykli zamarzania i odmarzania wody.

Na rys. 7 pokazano także inny przykład skutków procesu destrukcyjnej degradacji materiału, gdzie głównym mechanizmem degradacji był tu skurcz betonu. Konstrukcji wykona-

nej w warunkach wysokiej temperatury i niskiej wilgotności nie zapewniono zabezpieczeń ograniczających intensywność procesów reologicznych w okresie wiązania i dojrzewania betonu. W efekcie doprowadziło to do powstania licznych zarysowań, a nawet pęknięć betonu (w wielu miejscach o znacznej rozwarości), a także do destrukcji materiału.

Procesy przeciążeniowej degradacji konstrukcji

Procesy przeciążeniowej degradacji konstrukcji są związane z działaniem na konstrukcję obciążeń przekraczających wartości, na które została ona zaprojektowana, co w efekcie prowadzi do deformacji lub zmian położenia elementów konstrukcji, a także do destrukcji, ubytków lub utraty ciągliwości materiału (rys. 8). Dotyczy to zarówno obciążeń eksploatacyjnych o wartościach przekraczających założenia projektowe (np. transporty ponadnormatywne – patrz np. rys. 9), nadmiernych obciążeń stałych powstałych na przykład na skutek niewłaściwie wykonanych remontów

(rys. 10), jak i obciążeń wynikających z powodzi, kolizji, działań zbrojnych, eksploatacji górniczej czy też trzęsień ziemi (rys. 15). Nadmierne obciążenie konstrukcji może być także wywołane oddziaływaniem ekstremalnie wysokich (np. w wyniku pożaru) lub niskich (np. skrajnie mroźne warunki zimowe) temperatur.

Procesy degradacji przeciążeniowej mają najczęściej charakter zjawisk krótkotrwałych i w związku z tym są szczególnie niebezpieczne, zarówno dla konstrukcji, jak i dla jej użytkowników. Brak wyprzedzających objawów sygnalizujących inicjację procesów oraz bardzo szybki przebieg zjawisk takich jak kolizje, powódzie czy trzęsienia ziemi uniemożliwiają z reguły podjęcie działań zapobiegawczych.

Uszkodzenia żelbetowych obiektów mostowych

Hierarchiczna klasyfikacja uszkodzeń

Hierarchiczną klasyfikację uszkodzeń żelbetowych konstrukcji mostowych, umożliwiającą ich jednoznaczne usystematyzowanie, według koncepcji zaprezentowanej w [2], przedstawiono w tab. 6.

W przedstawionej klasyfikacji wyróżniono trzy podstawowe poziomy identyfikacji uszkodzeń:

- klasa uszkodzenia (poziom I) – identyfikowana na podstawie definicji wspólnych dla wszystkich rodzajów obiektów mostowych, rozwiązań konstrukcyjnych oraz

Tab. 6. Hierarchiczna klasyfikacja uszkodzeń żelbetowych konstrukcji mostowych

Klasa uszkodzenia	Rodzaj uszkodzenia	Kategoria uszkodzenia
Deformacje	Nieprawidłowa geometria elementu	Nieprawidłowy kształt betonu Nieprawidłowy układ zbrojenia
	Zmiana geometrii osi elementu	Nadmierna deformacja sprężysta Deformacja trwała
	Zmiana geometrii na długości elementu	Nadmierna deformacja sprężysta Deformacja trwała
Destrukcja materiału	Zmiana cech chemicznych	Zmiana cech betonu Zmiana cech stali zbrojeniowej Zmiana cech materiału warstwy zabezpieczającej
	Zmiana cech fizycznych	Zmiana cech betonu Zmiana cech stali zbrojeniowej Zmiana cech materiału warstwy zabezpieczającej
Ubyteki materiału	Ubytek materiału elementu	Ubytek betonu Ubytek stali zbrojeniowej
	Ubytek materiału warstw zabezpieczających	Ubytek warstw zabezpieczających beton Ubytek warstw zabezpieczających stal zbrojeniową
Utrata ciągłości materiału	Rysa	Zarysowanie betonu Zarysowanie stali zbrojeniowej Zarysowanie materiału warstwy zabezpieczającej
	Pęknięcie	Pęknięcie betonu Pęknięcie stali zbrojeniowej Pęknięcie materiału warstwy zabezpieczającej
Zanieczyszczenia	Nieorganiczne	Agresywne Neutralne
	Organiczne	Agresywne Neutralne
Zmiany położenia	Nieprawidłowe przemieszczenie liniowe	Nadmierne przemieszczenie Ograniczenie przemieszczenia
	Nieprawidłowy obrót	Nadmierne przemieszczenie Ograniczenie przemieszczenia

materiałów stosowanych w obiektach mostowych,

- rodzaj uszkodzenia (poziom II) – bardziej precyzyjnie określający charakter uszkodzeń należących do poszczególnych klas,
- kategoria uszkodzenia (poziom III) – uściślająca specyfikę uszko-

żenia określonej klasy i rodzaju, w powiązaniu z rodzajem materiału konstrukcyjnego.

Na najwyższym poziomie prezentowanego hierarchicznego systemu klasyfikacji (poziom I) wyróżniono sześć podstawowych klas uszkodzeń



12. Ubyteki betonu warstw zabezpieczających oraz ubytki stali zbrojeniowej dźwigarów mostowych



13. Utrata ciągłości materiału: rysy (po lewej) oraz pęknięcie (po prawej)



14. Zanieczyszczenia nieorganiczne neutralne (po lewej) oraz powierzchniowe zanieczyszczenia organiczne w postaci glonów (po prawej)



15. Zmiana położenia (obróć) całej konstrukcji mostowej w wyniku trzęsienia ziemi, połączona z deformacjami oraz ubytkami i utratą ciągłości materiału

występujących w obiektach mostowych wszystkich kategorii, niezależnie od rozwiązań konstrukcyjnych oraz zastosowanych materiałów. Podobnie w odniesieniu do wszystkich kategorii obiektów można zastosować wspólny jednolity system klasyfikacji rodzajów uszkodzeń (poziom II), umożliwiając uściślenie identyfikacji uszkodzeń należących do poszczególnych podstawowych typów. Kategorie uszkodzeń, identyfikowane na III poziomie klasyfikacji, zależą w znacznym stopniu od specyficznych właściwości materiału konstrukcji, a więc ten poziom klasyfikacji wymaga indywidualizacji w odniesieniu do poszczególnych materiałów konstrukcyjnych. Przykładowa trójpoziomowa klasyfikacja zaprezentowana w tab. 7 dotyczy konstrukcji żelbetonowych.

Deformacje

Deformacje to klasa uszkodzeń polegających na niezgodnych z projektem zmianach geometrii, powodujących zmiany wzajemnych odległości punktów obiektu lub jego części. Wśród uszkodzeń tego typu można wyróżnić trzy rodzaje deformacji (patrz tab. 6):

- nieprawidłowa geometria elementu obiektu mostowego (rys. 10 po lewej),
- zmiana geometrii osi lub powierzchni środkowej elementu przy zachowaniu kształtu elementu w przekroju poprzecznym (rys. 10 po prawej),

- zmiana dotycząca geometrii elementu w przekroju poprzecznym, bez deformacji osi (powierzchni środkowej) elementu.

Destrukcja materiału

Destrukcja materiału to klasa uszkodzeń polegających na pogorszeniu wartości cech fizyko-chemicznych materiału w stosunku do wartości projektowanych (patrz tab. 6). Uszkodzenia tej klasy można podzielić na dwa podstawowe rodzaje (rys. 11):

- niekorzystne zmiany cech chemicznych materiału w porównaniu do zaprojektowanych wartości tych cech,
- zmiany fizycznych właściwości materiału prowadzące do pogorszenia kondycji obiektu mostowego w porównaniu do stanu zaprojektowanego.

Ubytki materiału

Ubytki materiału to często spotykana klasa uszkodzeń konstrukcji z betonu zbrojonego (tab. 6) obejmująca uszkodzenia polegające na zmniejszeniu ilości materiału elementów konstrukcji w stosunku do rozwiązania zaprojektowanego. Jako podstawowe rodzaje tej klasy uszkodzeń wyróżnia się ubytki materiału konstrukcyjnego (beton, stal zbrojeniowa) oraz ubytki materiału warstw zabezpieczających (rys. 12).

Utrata ciągłości materiału

Do klasy „utrata ciągłości materiału” należą uszkodzenia polegające na niezgodnym z projektem przerwaniu ciągłości materiału konstrukcji (patrz tab. 6). Podstawowe rodzaje uszkodzeń zaliczane do tej klasy to (rys. 13):

- rysa, czyli utrata ciągłości materiału na części przekroju elementu konstrukcji,
- pęknięcie, czyli utrata ciągłości na całej powierzchni przekroju elementu.

Zanieczyszczenia

Zanieczyszczenia to klasa uszkodzeń polegających na występowaniu zabrudzeń obiektu lub na nieprzewidzianej w projekcie wegetacji na nim roślin lub mikroorganizmów (tab. 6). Można wyróżnić dwa podstawowe rodzaje uszkodzeń należących do tej klasy (patrz rys. 14):

- zanieczyszczenia nieorganiczne, które można podzielić na dwie kategorie: zanieczyszczenia agresywne, które inicjują degradację obiektu i wpływają na jej przebieg oraz zanieczyszczenia neutralne, które powodują głównie obniżenie estetycznych walorów obiektu,
- zanieczyszczenia organiczne, wśród których można wyróżnić zanieczyszczenia agresywne (np. wegetacja roślin, których korzenie przedostają się w głąb materiału konstrukcji) oraz zanieczyszczenia neutralne, oddziałujące

jedynie na powierzchnię elementów obiektu.

Zmiany położenia

Zmiany położenia to klasa uszkodzeń polegających na niezgodnym z projektem przemieszczeniach obiektu mostowego lub jego elementów, przy których wzajemne odległości wszystkich punktów przemieszczonej części nie ulegają zmianie, a także niezgodne z projektem ograniczenie możliwości przemieszczeń (patrz tab. 6).

- Można wyróżnić dwa następujące podstawowe rodzaje uszkodzeń polegających na zmianach położenia w stosunku do rozwiązań projektowych (patrz tab. 6):
- nieprawidłowe przemieszczenie liniowe elementów obiektu, polegające na przemieszczeniu nadmiernym (w stosunku do projektowanego) lub na ograniczeniu możliwości projektowanych przemieszczeń liniowych,
 - nieprawidłowe obroty elementów obiektu, manifestujące się nadmierną wartością obrotu w stosunku do warunków zaprojektowanych (patrz rys. 15) lub też ograniczeniem przewidzianych możliwości obrotu.

Podsumowanie

Przedstawiona propozycja klasyfikacji czynników związanych ze zjawiskami degradacji żelbetowych obiektów mostowych ma na celu usystematyzowanie i ujednoczenie sposobów identyfikacji oraz opisu relacji między stymulatorami, mechanizmami oraz procesami degradacji a uszkodzeniami. Powstające uszkodzenia są efektem działania zindywidualizowanych i z reguły skomplikowanych procesów degradacyjnych angażujących kilka mechanizmów degradacji. Wykrywanie i identyfikacja uszkodzeń oraz mechanizmów degradacji wymaga stosowania zaawansowanych technik i procedur diagnostycznych

Tab. 7. Mechanizmy degradacji żelbetowych konstrukcji mostowych a klasy uszkodzeń

Mechanizmy degradacji		Klasa uszkodzeń					
		Deformacje	Destrukcja materiału	Ubytki materiału	Utrata ciągliwości materiału	Zanieczyszczenia	Zmiany położenia
Fizyczne	Akumulacja zabrudzeń nieorganicznych		○	○		●	●
	Cykliczne zamarzanie/odmarzanie		●	●	○	○	
	Erozja		○	●			
	Krystalizacja		●	○	○		
	Oddziaływania ekstremalnych temperatur		○	○	○	○	
	Pełzanie	○					
	Relaksacja	○			○		
	Skurcz	○	○	○	●		
	Przeciążenia	●	○	●	●		●
	Wymywanie		●	○	○	●	
	Zmęczenie		○		○		
Zmiany warunków geotechnicznych	●		○	●		●	
Chemiczne	Karbonatyzacja		●				
	Korozja		●	●	○	○	
	Oddziaływania substancji agresywnych		○			○	
	Reakcje między składnikami materiału		●	●	○		
Biologiczne	Akumulacja zabrudzeń organicznych		○	○		●	○
	Oddziaływania mikroorganizmów		○	○		●	
	Oddziaływania roślin		○	○		●	○
	Oddziaływania zwierząt		○			○	

Oznaczenia: ● – mechanizm podstawowy; ○ – mechanizm dodatkowy

wykorzystujących technologie fizyczne, chemiczne oraz biologiczne, a także nowoczesne technologie interdyscyplinarne. Szczegółowe informacje na ten temat są zawarte między innymi w pracach: [2], [5], [16], [18], [22], [23], [28], [31]-[38].

W zaprezentowanym systemie hierarchicznej trójpoziomowej klasyfikacji uszkodzeń specyficznych dla żelbetowych obiektów mostowych (tab. 6) wyróżniono 6 podstawowych klas uszkodzeń, 13 rodzajów uszkodzeń oraz 30 kategorii uszkodzeń. Przedstawiona klasyfikacja ma charakter otwarty i może być łatwo uzupełniana o nowe klasy, rodzaje i kategorie uszkodzeń, a także dodatkowe poziomy klasyfikacji umożliwiające bardziej szczegółową identyfikację uszkodzeń. Relacje między aktywnością poszczególnych mechanizmów degradacji, typowych dla konstrukcji żelbetowych, a powstawaniem uszkodzeń należących do poszcze-

gólnych klas zaprezentowano w tab. 7. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Bień J. Modelowanie obiektów mostowych w procesie ich eksploatacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2002.
- [2] Bień J. Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2010.
- [3] Bień J. Systemowe wspomaganie zarządzania mostami drogowymi i kolejowymi. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, 2012, Zeszyt 59, nr 3/12/I, s. 49-68.
- [4] Biliszcuk J., Machelski Cz., Maliszkievicz P., Mistewicz M. Typowe uszkodzenia drogowych betonowych mostów prefabrykowanych, Drogownictwo, 1994, nr 8, s. 186-194.
- [5] Biliszcuk J., Bień J., Maliszkievicz P., Mistewicz M., Onysyk J.,

- Rabiega J. Podręcznik inspektora mostowego. Cz. 1 i 2, Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Lądowej, 1995.
- [6] Flaga K. Wpływ czasu na mosty żelbetowe i z betonu sprężonego. Inżynieria i Budownictwo, 1997, nr 6, s. 381–382.
- [7] Biliszczuk J., Onysyk J., Węgrzyński M. Typowe uszkodzenia maszynowych podpór obiektów mostowych. Ochrona przed korozją, 1997, nr 1, s. 6–9.
- [8] Wieczorek G. Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki i karbonatyzację otuliny. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2002.
- [9] Zobel H.: Naturalne zjawiska termiczne w mostach. WKŁ, 2002.
- [10] Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures – COST 521. Final Report (Eds. Cigna R., Andrade C., Nürnberger U., Polder R., Weydert R., Seitz E.), European Commission, Directorate-General for Research, 2003.
- [11] Furtak K., Śliwiński J. Materiały budowlane w mostownictwie. WKŁ, 2004.
- [12] Choi S., Park S., Bolton R., Stubbs N., Sikorsky C. Periodic Monitoring of Physical Property Changes in a Concrete Box-Girder Bridge. Journal of Sound and Vibration, 2004, No. 278, s. 365–381.
- [13] Błaszczczyński T. Konstrukcje żelbetowe poddane działaniu produktów ropopochodnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2004.
- [14] Bień J., Jakubowski K., Kamiński T., Kmita J., Rawa P., Cruz P., Maksymowicz M. Railway bridge defects and degradation mechanisms, W: "Sustainable Bridges – Assessment for Future traffic Demands and Longer Lives" (Eds: Bień J., Elfgrén L., Olofsson J.), Wrocław 2007, s. 105-116.
- [15] Zobel H., Alkhafaji T., Wróbel M. Określanie trwałości mostów drogowych. Mosty, 2007, nr 2, s. 40-54.
- [16] Kurdowski W., Garbacik A. Najczęstsze błędy w ocenie przyczyn uszkodzeń betonu i jego zagrożenia awarią, XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje, 2007, s. 81-92.
- [17] Czarnecki L., Emmons P.H. Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Polski Cement Sp. z o.o., 2002.
- [18] Runkiewicz L. Badania konstrukcji żelbetowych. Biuro Gamma, 2002.
- [19] Ściślewski Z. Ochrona konstrukcji żelbetowych. Arkady, 1999.
- [20] Łakomy T. Korozja zbrojenia w obiektach mostowych w zależności od stanu betonu w konstrukcji (rozprawa doktorska), Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, 2009.
- [21] Runkiewicz L. Wpływ błędów projektowych i realizacyjnych na korozję i awaryjność obiektów budowlanych. Ochrona przed Korozją, 2004, nr 5s/A, s. 229-234.
- [22] Schweitzer P.A. Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods. CRC Press, 2009.
- [23] Zybur A., Jaśniok T. Diagnostyka stanu korozyjnego zbrojenia w żelbetowych obiektach komunikacyjnych. Drogownictwo, 2000, nr 4, s. 109-116.
- [24] Failure, Distress and Repair of Concrete Structures (Ed.: Delatte N.), CRC Press, 2009.
- [25] Libudysz Z. Mikrobiologia techniczna. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2000.
- [26] Zyska B. Mikrobiologiczna korozja materiałów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1977.
- [27] Zyska B. Katastrofy, awarie i zagrożenia mikrobiologiczne w przemyśle i budownictwie. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2001.
- [28] Campbell D.H., Sturm R.D. and Kosmatka, S.H. Detecting Carbonation, Concrete Technology Today, 199, Vol. 12, Nr 1.
- [29] PN-EN 14630:2007. Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Oznaczanie głębokości karbonatyzacji w stwardniałym betonie metodą fenoloftaleinową.
- [30] CEB Design Guide to Durable Concrete Structures. Comité Euro-International du Béton, 1989.
- [31] Hellier Ch.J. Handbook of nondestructive evaluation. McGraw-Hill, 2001.
- [32] Shull P.J. Nondestructive evaluation: theory, techniques and applications. Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [33] Malhorta V.M., Carino N.J. CRC Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press, 2003.
- [34] Helmerich R., Bień J., Cruz P. A guideline for inspection and condition assessment including the NDT-toolbox. W: "Sustainable Bridges – Assessment for Future traffic Demands and Longer Lives" (Eds: Bień J., Elfgrén L., Olofsson J.), Wrocław 2007, s. 93-104.
- [35] Bień J., Gładysz-Bień M. Klasyfikacja diagnostycznych badań obiektów mostowych. Inżynieria i Budownictwo, 2014, nr 7, s. 364-368.
- [36] Hoła J., Bień J., Sadowski L., Schabowicz K. Non-destructive and semi-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2015, Vol. 63, Issue 1, s. 87–96.
- [37] J Bień J., Gładysz-Bień M. Multi-level classification of bridge defects in asset management. W: Towards a resilient built environment risk and asset management : IABSE Symposium 2019, Guimarães, Portugal, 2019, s. 1100-1107.
- [38] Bień J., Kamiński T., Kużawa M., Taxonomy of non-destructive field tests of bridge materials and structures. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2019, Vol. 19, No. 4, s. 1353-1367.