

# Trwałość eksploatacyjna mostów zespolonych

## Service life of composite bridges

prof. dr hab. inż. Adam Wysokowski (ORCID: 0000-0002-4547-2453), Instytut Budownictwa, Uniwersytet Zielonogórski

DOI 10.5604/01.3001.0053.6990

**Streszczenie:** Pomosty betonowe (żelbetowe), w mostach zespolonych (stalowo-betonowych), są często stosowane z uwagi na ich zalety, ale też ze względu na trwałość. W tego typu obiektach zespolonych beton w postaci płyty pomostowej współpracuje z dźwigarem stalowym i jest stosowany w strefie ściskania (wyjątek stanowi strefa nad podporami w obiektach o schemacie ciągłym), gdzie są wykorzystane w pełni zalety tego materiału konstrukcyjnego. Na podstawie doświadczeń związanych z trwałością eksploatowanych od wielu lat mostów zespolonych można stwierdzić, że niewątpliwym zagadnieniem jest trwałość konstrukcyjno-materiałowa płyt żelbetowych. W artykule zostaną przedstawione zagadnienia dotyczące trwałości eksploatacyjnej mostów o konstrukcji zespolonej, w aspekcie różnych rozwiązań konstrukcyjnych tych specyficznych obiektów mostowych.

**Słowa kluczowe:** mosty zespolone, trwałość eksploatacyjna, trwałość zespolenia, trwałość betonu.

**Abstract:** Concrete (reinforced concrete) deck slabs, in steel-framed bridges, are often used because of their undeniable advantages, including, among others, durability. In such composite structures, concrete in the form of a deck slab cooperates with a steel girder and is used in the compression zone, where the full advantages of this structural material are utilized. Based on the experience of the durability of composite bridges that have been in operation for many years, it can be concluded that the critical issue is the structural durability of the reinforced concrete slabs themselves. The article will present issues concerning the service life of bridges with composite structures, in terms of various structural solutions of bridges.

**Keywords:** composite bridges, service life, durability of structural composite, durability of concrete.

## 1. Wprowadzenie

W przypadku mostowych betonowych płyt pomostowych wykonanych w konstrukcjach zespolonych trwałość i zagadnienia z nią związane dotyczą najczęściej tych samych problemów jak w przypadku trwałości płyt w mostach betonowych. Pomostowa płyta betonowa rozkłada obciążenia, skutecznie usztywniając wielokierunkowo cały obiekt. Jednakże na ogół płyty we wcześniej wybudowanych mostach zespolonych mają niewielką grubość (idea stosowania płyt), a co za tym idzie, wymagają specyficznego podejścia do zagadnień związanych z ich trwałością eksploatacyjną już na etapie projektowania. Nowe technologie betonu, w tym dodatki i domieszki, zespolenie dwukierunkowe konstrukcji płyt pomostowych, a także ich sprzężenie tworzące konstrukcję hybrydową powodują znaczący wzrost trwałości wznoszonych obiektów mostowych o konstrukcji zespolonej.

Jednak eksploatowana jest znaczna liczba obiektów wybudowanych w poprzednich dekadach, w których zaczęto doceniać zalety konstrukcji zespolonych, szczególnie przy typowych w naszym kraju rozpiętościach ich przęseł (w przedziale 15,0–27,0 m). Niejednokrotnie obiekty te są narażone przy negatywnych czynnikach środowiskowych, na niski poziom ich utrzymania, co ze względu na specyfikę tych konstrukcji często prowadzi do poważnych uszkodzeń

strukturalnych powodujących w konsekwencji wyłączenia tych obiektów komunikacyjnych z eksploatacji.

## 2. Czynniki mające wpływ na trwałość mostów zespolonych

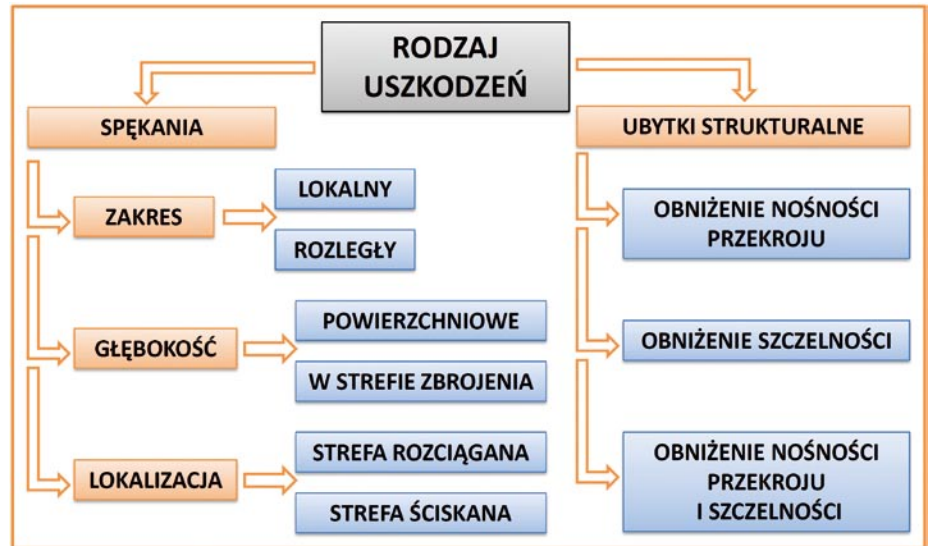
Podstawowym czynnikiem decydującym o odpowiedniej trwałości mostów zespolonych jest wykonanie właściwej, szczelnej i połączonej z płytą membrany hydroizolacyjnej wraz z realizacją dodatkowego zabezpieczenia w postaci właściwego systemu odwodnienia oraz dodatkowo zgodnie z obowiązującymi przepisami, szczelnej nawierzchni jezdni [8].

Ogólną charakterystykę głównych fizycznych uszkodzeń pomostów betonowych w mostach zespolonych pokazano na poglądowym schemacie na rysunku 1 [1].

Ponadto na ich trwałość duży wpływ ma także jakość wykorzystanych materiałów: stali i betonu, sposób rozmieszczenia wkładek zbrojeniowych oraz zapewnienie właściwej grubości otulenia prętów zbrojenia płyty. Wyjściowe parametry betonu, w najczęściej niesprzyjających warunkach środowiskowych eksploatacji mostu, ulegają zmianie w czasie wraz z ich właściwościami chemicznymi [2].

W prawie wszystkich procesach chemicznych i fizycznych wpływających na trwałość konstrukcji betonowych biorą udział dwa dominujące czynniki: woda w obrębie porów

**Rys. 1.** Podstawowe uszkodzenia betonu konstrukcyjnego i ich charakterystyka [1]



betonu i spękania strukturalne. W przypadku pomostów betonowych należy dodatkowo brać pod uwagę czynniki wynikające z warunków eksploatacji m.in.:

- duża liczba cykli zamrażania i rozmrażania,
- wpływ soli odladzających,
- penetracja związków chemicznie agresywnych,
- reakcja alkaliczno-krzemionkowa w betonie,

• karbonatyzacja betonu w związku z przenikaniem  $\text{CO}_2$ . Równoczesne działanie tych czynników należy do najbardziej krytycznego procesu degradacji betonu, gdyż może doprowadzić do całkowitego zniszczenia elementu w relatywnie krótkim czasie [3].

Opisywane wyżej negatywne zjawiska chemiczne związane z trwałością żelbetu są dobrze znane i opisane w literaturze technicznej, m.in. w pracach [4, 5, 6, 7].

Według opisywanych w literaturze przedmiotu doświadczeń wielu specjalistów od betonu – w tym tych tworzących Eurokod 1992 – uważa, że prawidłowo zaprojektowany i wykonany beton, przy odpowiedniej otulinie prętów zbrojeniowych, stanowi jedną z najlepszych metod ochrony stali przed korozją (patrz prace Rostama, np. [12]).

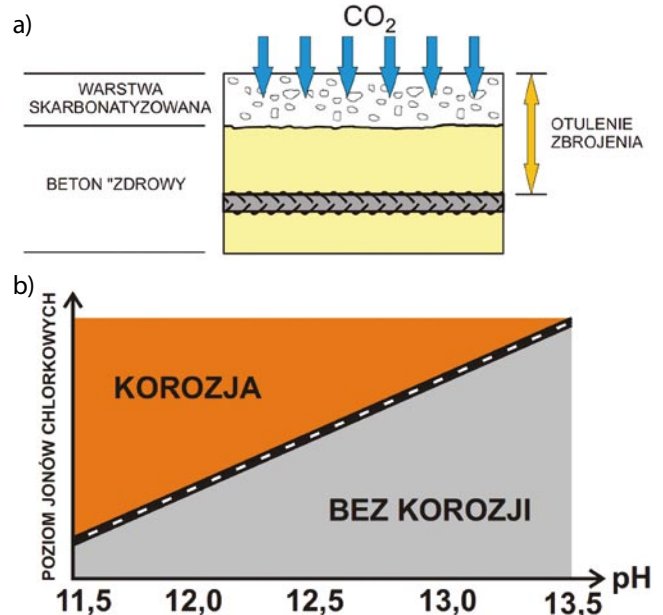
Jednak, jak uczy doświadczenie, przy nieodpowiednich jego parametrach wyjściowych – z czasem eksploatacji w trudnych warunkach ekspozycji beton zmienia swoje właściwości chemiczne i przy nieodpowiedniej grubości otuliny prętów staje się agresywny dla stali. Z tego względu zamiast stanowić ochronę antykorozyjną prętów stali zbrojeniowej jego sąsiedztwo przyspiesza ich korozję. Produkty korozji zwiększając swoją objętość, rozsadzają otulinę betonową, która w pierwszej fazie tego procesu pęka, a następnie odpada i odsłania pręty zbrojeniowe.

Należy tu stwierdzić, na podstawie licznych doświadczeń, że taka degradacja płyty pomostowej powoduje, że nie ma możliwości skutecznej naprawy konstrukcji. Wynika to z faktu, że zmiany chemiczne, które nastąpiły w betonie, są nieodwracalne. Powierzchniowa naprawa, bez skucia i usunięcia zdegradowanego betonu aż do betonu o właściwych parametrach ochronnych dla stali zbrojeniowej, powoduje najczęściej brak skuteczności takiej naprawy. Następuje wtedy dalsza degradacja uszkodzonych miejsc pomimo wykonanej naprawy konstrukcji płyt pomostowych, czasami dużym nakładem.

Podstawowym czynnikiem obniżającym  $\text{pH}$  betonu konstrukcyjnego jest proces nazywany karbonatyzacją. Jest

to przemiana tlenku wapnia  $\text{CaO}$  lub jego wodorotlenku  $\text{CaOH}$  w węglan wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ) na skutek obecności w powietrzu dwutlenku węgla  $\text{CO}_2$ . Rozpuszczony w wodzie, obecny w betonie, wodorotlenek wapnia reaguje z dwutlenkiem węgla obecnym w powietrzu, tworząc węglan wapnia. Szybkość postępu karbonatyzacji jest zależna od stopnia szczelności betonu. Porowaty, nieszczelny lub spękany beton umożliwia przyspieszenie negatywnego procesu karbonatyzacji. Można więc kolokwialnie stwierdzić, że im „lepsz” i szczelniejszy beton, tym problem karbonatyzacji jest bardziej ograniczony, co podnosi trwałość betonu, którego utrzymanie nie wymaga specjalistycznych zabiegów.

Kolejnym czynnikiem, o równie dużym znaczeniu dla trwałości pomostowych płyt betonowych, jest obecność i poziom zawartości chlorków w betonie. Podobnie jak w przypadku



**Rys. 2.** Mechanizm degradacji otuliny betonowej: a) wpływ  $\text{CO}_2$  na karbonatyzację warstwy przypowierzchniowej betonu, b) zależność pomiędzy zawartością jonów chlorkowych a  $\text{pH}$  betonu



**Rys. 3.** Przykłady stanu technicznego żelbetowych płyt pomostowych eksploatowanych obiektów mostowych o konstrukcji zespolonej: a) widok płyty zespolonej z dźwigarami kratownicowymi – widoczne przecieki, raki i ogólna korozja warstwy przypowierzchniowej betonu, b) widok spodu konstrukcji mostu drogowego z licznymi spękaniem powierzchni płyty pomostowej, c) przykład płyty ze skosami – widoczne zacieki, zwłaszcza w obrębie dźwigarów stalowych, d) przykład płyty pomostowej obiektu z zastosowaniem niedostatecznej grubości otuliny betonowej – widoczne rdzawe zacieki w rozstawie zgodnym z rozstawem prętów poprzecznych płyty żelbetowej



poprzednim, zjawisko to jest dobrze rozpoznane i opisane w literaturze technicznej. Jednak pomimo jego dużego znaczenia, nadal poświęca się mu zbyt mało uwagi. Zawartość chlorków w betonie jest o tyle groźna, że powoduje zarówno korozję betonu, jak i stali. Wynika to głównie ze stosowania środków do zwalczania gołolegdy – głównie chlorku sodu i chlorku wapnia. Znajdują się one w większym stężeniu nie na powierzchni płyt, ale na pewnej głębokości elementu, co jest szczególnie groźne dla stalowych prętów zbrojeniowych płyt żelbetowych pomostu.

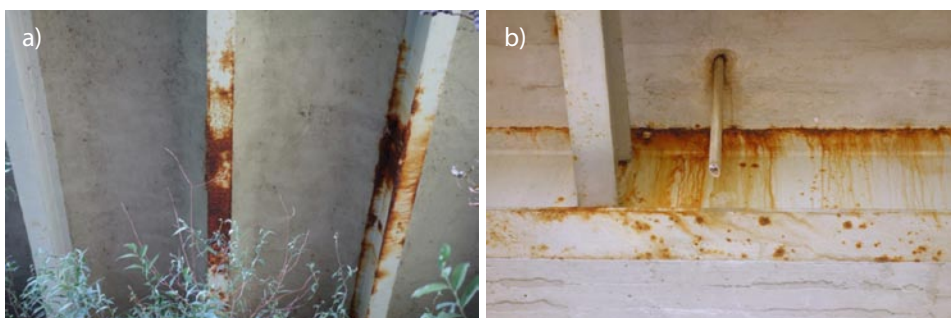
W celu zlustrowania wagi tych negatywnych zjawisk na rysunku 3 pokazano przykłady stanu żelbetowych płyt pomostowych obiektów infrastrukturalnych z własnych doświadczeń autora (fotografie pochodzą z przeglądów okresowych

obiektów mostowych wg SGM). Analizując te przykłady, w wielu przypadkach można stwierdzić występowanie siatek spękań płyt pomostowych, które znacznie potęgują ekspozycję głębszych warstw betonu na negatywne czynniki środowiskowe.

Nie mniej ważnym problemem jest właściwe zabezpieczenie tych konstrukcji przed wodą opadową. Dotyczy to zarówno szczelnej izolacji, jak i elementów odwodnienia (rury spustowe i sączki), które „przenikając” płytę pomostową tworzą miejsca szczególnie podatne na zjawiska korozyjne (rys 4. a i b).

Innym ważnym problemem technicznym mostów zespolonych jest trwałość korozyjna samej konstrukcji stalowej obiektu. W celu ilustracji problemu korozji na rysunku 5

**Rys. 4.** Problem izolacji i odwodnienia w mostach zespolonych: a) widok korozji spowodowanej miejscowym przeciekiem wód opadowych przez izolację, b) przykład zaawansowanej korozji dźwigara stalowego w obrębie sączka



**Rys. 5.** Problem korozji stalowych dźwigarów głównych:

a) widok ogólnej korozji dźwigarów głównych i poprzecznic na skutek ogólnej zawilgocenia konstrukcji stalowej, b) przykład degradacji kratownicowego dźwigara stalowego kładki dla pieszych



**Rys. 6.** Przykłady korozji strefy zespolenia w mostach zespolonych na skutek przecieków wody opadowej



pokazano przykłady złego stanu konstrukcyjnych elementów stalowych w mostach zespolonych.

Wymienione wyżej negatywne zjawiska fizyczne i chemiczne zachodzące w betonie i stali mają znaczący wpływ na ogólną trwałość mostów zespolonych, głównie poprzez podany wcześniej fakt, że beton traci właściwości ochronne dla stali zbrojeniowej, a dodatkowo przyspiesza korozję zarówno samych prętów zbrojeniowych, jak również stalowych elementów konstrukcyjnych.

### 3. Wpływ strefy zespolenia na trwałość mostów zespolonych

Specyficznym i niezwykle istotnym zagadnieniem w przypadku konstrukcji zespolonych jest obszar zespolenia płyty betonowej z dźwigarami i belkami stalowymi (w tym w nowych konstrukcjach – również z zespoleniem poprzecznic). W tych niewralgicznych miejscach łączą się dwa różne materiały, o jakże innych parametrach (m.in. o różnych modułach Younga). Różna jest także specyfika korozyjna tych materiałów, które połączone są w miejscu ich zespolenia. Z tego względu, co potwierdzają liczne własne doświadczenia autora z przeglądów konstrukcji mostów zespolonych, nagminnie występuje problem z korozją dźwigarów, głównie pasów górnych, na połączeniu z betonem płyt pomostowych.

Wynika to z faktu trudności wykonania właściwego zabezpieczenia antykorozyjnego tych zewnętrznych miejsc styku stali z betonem (różnice we właściwościach farb antykorozyjnych do stali i betonu). Pomimo właściwie wykonanych

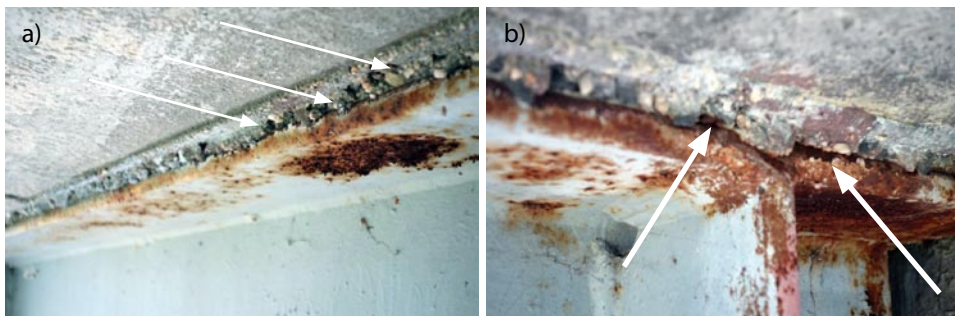
prac antykorozyjnych w miejscu połączenia elementu stalowego z betonem powstają naturalne mikroszczeliny lub szczeliny. Z czasem powoduje to wzmożoną korozję, szczególnie po wstępnym zainicjowaniu tego zjawiska.

Zapoczątkowany proces korozji, wraz z upływem czasu, rozwija się bowiem coraz intensywniej (rys. 6).

Zjawisku korozji sprzyja fakt, że pod obiektami mostowymi (o czym już wspomniano) przy różnicach temperatur dochodzi do naturalnego zawilgacania tych niewralgicznych miejsc. Równocześnie najczęściej dochodzi do korozji betonu na połączeniu ze stalą, co zwiększa porowatość betonu w tej strefie. Przyczynia się to bezpośrednio do dalszej degradacji zarówno betonu, jak i stali w tych miejscach. Opisowaną sytuację przedstawiono na rysunku 7. Według doświadczeń własnych autora ma to istotny wpływ na trwałość omawianych konstrukcji. Dodatkowo stwierdza się, że jest to zjawisko często występujące w mostach zespolonych i jest ono niezwykle trudne do wyeliminowania, nawet przy wysokim poziomie utrzymania mostu, z uwagi na mechanizm jego działania [8].

Dla ograniczenia wpływu tego zjawiska powinna być zastosowana dodatkowa ochrona antykorozyjna (dla dźwigarów stalowych) oraz odpowiednia obróbka (betonu) i ewentualne doszczelnienie tej strefy z wykorzystaniem nowoczesnej

**Rys. 7.** Szczegóły stref zespolenia pomiędzy dźwigarem stalowym a płytą żelbetową: a) widok rozwarstwienia się mieszanki betonowej w strefie zespolenia płyty z górnym pasem blachownicy, b) przykład wpływu nieszczelności w miejscu zespolenia na rozwój ognisk korozji ogólnej dźwigara stalowego w strefie podporowej





chemii budowlanej lub materiałów na bazie żywic epoksydowych i poliestrowych [9].

#### 4. Wpływ sprężenia płyty pomostu na trwałość

Jak już wspomniano, należy mieć świadomość, że w przypadku konstrukcji zespolonych występowanie pęknięć, nawet o niewielkiej szerokości (do 0,1 mm), wpływa znacząco na proces korozji zarówno betonu jak i w konsekwencji stali zbrojeniowej.

Dyfuzja jonów chlorkowych potrafi być dziesięciokrotnie szybsza w betonie spękanym niż w betonie bez uszkodzeń. Oznacza to, że okres inicjacji zjawisk korozyjnych będzie około dziesięciokrotnie dłuższy w porównaniu z materiałem zarysowanym pod warunkiem, że w obu przypadkach przepuszczalność materiału jest niska i otulina betonowa prętów jest zachowana. Z tego względu spękanie płyt betonowych, w odniesieniu do trwałości, staje się krytycznym parametrem z dużo większą niepewnością obliczeniową w odniesieniu do bezpieczeństwa eksploatacyjnego konstrukcji mostowej [10].

W celu zwiększenia trwałości płyty, a tym samym ochrony przed wystąpieniem spękań reologicznych można zastosować sprężenie. Biorąc pod uwagę specyfikę „pracy” płyty pomostowej w mostach zespolonych, sprężenie zarówno w kierunku poprzecznym, jak i wzdłużnym będzie miało korzystny wpływ na trwałość.

W przypadku stosowania sprężenia płyty należy dokładnie przeanalizować rodzaj sprężenia.

W praktyce inżynierskiej stosuje się kilka typów sprężania.

- Sprężenie przez podnoszenie konstrukcji stalowej. W metodzie tej konstrukcja stalowa jest podnoszona (dodatkowo strzałka ugięcia) przed betonowaniem płyty pomostowej. Po stwardnieniu betonu płyta zespolona jest opuszczana do poziomu wyjściowego. Metoda ta może być stosowana głównie w przypadku belek swobodnie podpartych. W ciągłych mostach zespolonych o dużych

rozpiętościach wymagane odkształcenie wykonawcze belek stalowych staje się bardzo duże, a co za tym idzie, wymaga to zaangażowania sprzętu ciężkiego, co bezpośrednio podnosi koszty inwestycji. Ponadto w przypadku tej metody straty sprężenia w płycie betonowej mogą wynosić do 50%.

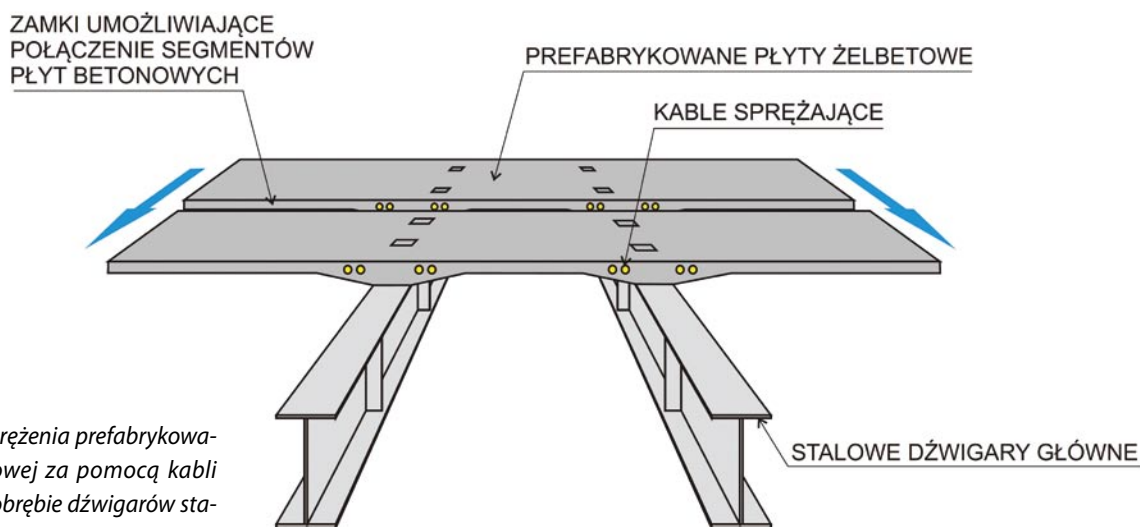
- Sprężenie płyty i konstrukcji stalowej (przekroju zespolonego) za pomocą kabli sprężających umieszczonych w kanałach wzdłuż płyty betonowej (głównie w strefie podpór pośrednich). Metoda ta jest często stosowana do sprężania obiektów o konstrukcji ciągłej, wieloprzęsłowej. Wadą tego typu rozwiązania są znaczne siły sprężające w obrębie podpór skrajnych, co wymaga stosowania bloków kotwiących redukujących ewentualne spękania płyty w tej strefie.

- Sprężenie tylko płyty pomostowej, przy użyciu kabli umieszczonych w kanałach wzdłuż płyty. W tej metodzie tej płyta jest sprężana przed połączeniem z konstrukcją stalową. Metoda ta jest szczególnie efektywna w przypadku płyt prefabrykowanych, ale również jest powszechnie stosowana w przypadku płyt wykonywanych na miejscu.

Podczas sprężania płyta „ślizga” się na górnym pasie dźwigara konstrukcji stalowej. Metoda ta ma zarówno zastosowanie dla obiektów wolnopodpartych, jak i ciągłych. Przykład takiego rozwiązania sprężenia pokazano na rysunku 8.

- Sprężenie kablami zewnętrznymi z wykorzystaniem lekkich konstrukcji kratownicowych. Metoda ta jest czasami stosowana do wzmacniania istniejących mostów zespolonych. Zaletą tego rozwiązania jest ułatwiony przegląd stanu technicznego kabli sprężających oraz ich konserwacja.

Przy projektowaniu sprężenia płyty istotne jest określenie wielkości naprężeń wstępnych, które należy wprowadzić do płyty w celu w zapewnienia wystarczającej wytrzymałości na wymagany okres użytkowania. Przede wszystkim należy wziąć pod uwagę wstępne naprężenie, które musi uwzględniać straty sprężenia spowodowane pełzaniem i skurczem.



**Rys. 8.** Przykład sprężenia prefabrykowanej płyty pomostowej za pomocą kabli umieszczonych w obrębie dźwigarów stalowych [11]

Dodatkowo należy bezwzględnie brać pod uwagę aspekt ekonomiczny, ponieważ sprzężanie jest wprowadzane głównie dla celów trwałościowych i nie jest wymagane z punktu widzenia zachowania konstrukcji pod względem wytrzymałościowym [10]. Ponadto stosunkowo trudno jest obliczyć rzeczywiste naprężenia wywołane przez sprzężanie płyty, głównie ze względu na jej niewielką grubość w stosunku do tradycyjnych konstrukcji z betonu sprzężonego.

Inną metodą na zwiększenie trwałości konstrukcji zespolonych oprócz sprzężenia jest stosowanie specjalnych łączników dla belek stalowych w strefie ich zespolenia. Do najnowszych rozwiązań można zaliczyć trzpienie, geometrycznie wykształcone z płyt stalowych przyspawanych do górnej półki belek dźwigarów lub wykształcone bezpośrednio ze środka belek stalowych [13, 14]. Główną zaletą w porównaniu do trzpieni z łbem jest wyższa nośność i wystarczająca zdolność do odkształceń nawet w betonie o wysokiej wytrzymałości, dzięki czemu mogą być klasyfikowane jako ciągłe łączniki ścinane według EN 1994-1-1 [15].

## 5. Podsumowanie

Mosty o konstrukcji zespolonej są szeroko stosowane w budownictwie komunikacyjnym na świecie i w naszym kraju, z uwagi na ogólnie znane zalety tych obiektów. Dlatego też ważna jest trwałość eksploatacyjna tych obiektów decydująca o cyklu ich życia. Istotne jest również właściwe utrzymanie połączone z okresowymi przeglądami tych ważnych elementów infrastruktury komunikacyjnej.

Biorąc pod uwagę opisane w artykule destrukcyjne czynniki fizyczne i chemiczne, należy stwierdzić, że w celu uzyskania wymaganej trwałości płyty betonowej mostu zespolonego należy:

- stosować dobrej jakości system izolacji wodoszczelnej,
- stosować mieszankę betonową o dobrych właściwościach mechanicznych i bardzo niskiej przepuszczalności,
- zapewnić odpowiednią grubość otuliny betonowej w celu ochrony zbrojenia,
- stosować odpowiednio trwałe zabezpieczenia antykorozyjne, szczególnie w strefie zespolenia stal-beton,
- stosować nowe i trwalsze rozwiązania dotyczące łączników strefy zespolenia.

Dodatkowo liczne badania i analizy dotyczące trwałości płyt w mostach zespolonych prowadzone na świecie, a w szczególności badania wpływu szerokości zarysowania na trwałość, wskazują jednoznacznie, że należy stosować wysoki reżim technologiczny dotyczący m.in. rozmieszczenia prętów zbrojeniowych w płytach, ponieważ szerokość rysy może mieć tendencję do zwiększania się z powodu oddziaływań dynamicznych oraz ruchem ciężkim wywołującym efekty zmęczeniowe w betonie.

W celu dodatkowej ochrony przed spękaniem zaleca się stosowanie dodatkowego doprężania (uszczelniania) płyt

pomostowych, które bezpośrednio wpływa korzystnie na poprawę trwałości płyty, a tym samym również konstrukcji stalowej. Jednocześnie przy projektowaniu należy mieć świadomość, że pełne sprzężenie płyt jest dalece nieekonomiczne, biorąc pod uwagę jedynie aspekt trwałościowy. Z drugiej strony sprzężenie redukuje w znacznym stopniu propagację ewentualnych rys, a tym samym ogranicza w znacznym stopniu efekty zmęczeniowe zarówno w samej płycie betonowej, jak i konstrukcji stalowej [3].

Zgodnie z opisanym w artykule opisem degradacji konstrukcji mostów zespolonych trwałość pomostu zależy głównie od poziomu depasywacji stali zbrojeniowej. Zatem ogólna trwałość mostu jest ograniczona przez rozwój korozji zbrojenia. Prowadzi to w konsekwencji do niepewności co do trwałości użytkowej. Z tego względu zaleca się prowadzić stały monitoring użytkowanych w naszym kraju obiektów mostowych o konstrukcji zespolonej, tak aby ich oczekiwana trwałość eksploatacyjna była zachowana w całym założonym okresie użytkowania.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Czarnecki L., Emmons P. H., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków, 2002
- [2] Bień J., Zjawiska degradacji i uszkodzenia kolejowych obiektów mostowych, Przegląd Komunikacyjny 11–12/2010, str. 34–40
- [3] Ernens M., Cremer J.-M., Dotreppe J.-C., Cracking and durability of concrete slabs of composite bridges, IABSE reports nr 999, 1997
- [4] Jamroz Z., Beton i jego technologie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2015
- [5] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków, 2010
- [6] Kurdowski W., Podstawy chemiczne mineralnych materiałów budowlanych i ich właściwości, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków, 2018
- [7] Wysokowski A., Trwałość mostów stalowych w funkcji zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych, praca habilitacyjna, IBDiM, Seria: Studia i Materiały, zeszyt 53, Warszawa, 2001
- [8] Wysokowski A. Trwałość mostów stalowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2022
- [9] Rowińska W., Wodyński R., Wysokowski A., Żurawicka A., Zalecenia do wykonywania oraz odbioru napraw i ochrony powierzchniowej betonu w konstrukcjach mostowych (Załącznik do Zarządzenia nr 10 Generalnego Dyrektora GDDP z dnia 27 listopada 1998 r.), IBDiM – GDDP Warszawa, 1998
- [10] Dotreppe J.-C., Degradation mechanisms and service life of concrete slabs of composite bridges. Durability of Building Materials and Components 8. Institute for Research in Construction, Ottawa ON, K1A 0R6, Canada, 1999, str. 16–27
- [11] Ma H., Shi X., Zhang Y., Long Term Behaviour of Precast Concrete Deck Using Longitudinal Prestressed Tendons in Composite I-Girder Bridges
- [12] Rostam S., Reinforced concrete structures—shall concrete remain the dominating means of corrosion prevention? Materials and Corrosion 6/2003, str. 369–378
- [13] Koźuch M., Lorenc W., The behaviour of clothoid-shaped composite dowels: Experimental and numerical investigations. Journal of Constructional Steel Research 167, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105962>
- [14] Kopp M., Wolters K., Claßen M., Hegger J., Gundel M., Gallwosch J., Heinemeyer S., Feldmann M., Composite dowels as shear connectors for composite beams – Background to the design concept for static loading, Journal of Constructional Steel Research, 147, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.013>
- [15] EN 1994-1-1. Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków