DOI: 10.7409/rabdim.025.010

SYLWIA SCHOENOWITZ-ŻURADZKA [1)]
ORCID: 0009-0008-0226-0881
PIOTR GWOŹDZIEWICZ [2)]
ORCID: 0000-0002-8161-3612
TERESA STRYSZEWSKA [3)]
ORCID: 0000-0003-1984-4425

Corrosion progress in bridge suspension cables and prestressing cables after 14 years of operation

Abstract: Cables suspending the decks of transport infrastructure facilities and prestressing cables should be sufficiently protected from the effects of corrosion throughout their service life. Inadequate protection of suspension cables resulting from design and workmanship errors, poor choice of materials or damage and insufficient maintenance work creates conditions for the development of corrosion processes and often leads to the need for repairs to extend the life of the structure and slow down the process of structural degradation. The paper presents the results of observations and surveys of suspension elements and prestressing cables in an existing bridge structure, which illustrate the actual extent of progressive changes in their technical condition after 14 years of operation. In addition, it is demonstrated that corrosion processes also occur in a bridge structure designed in accordance with current regulations.

Keywords: prestressed concrete, suspension cables, operation, prestressing cables, durability.

[1)] Cracow University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 24 Warszawska St., 31-155 Cracow, Poland; sylwia.schoenowitz-zuradzka@pk.edu.pl (✉)
[2)] Cracow University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 24 Warszawska St., 31-155 Cracow, Poland; piotr.gwozdziewicz@pk.edu.pl
[3)] Cracow University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 24 Warszawska St., 31-155 Cracow, Poland; teresa.stryszewska@pk.edu.pl

Article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License **(CC–BY 4.0)**

1. INTRODUCTION

Changes in the features of a structure that determine its ability to operate for many years without incurring excessive repair costs depend on a number of factors and parameters. The dynamics of these changes is a consequence of the type and quality of materials used, the construction solutions applied, as well as the operating conditions and extent of maintenance work. The development of the technologies used and the possibility of selecting modern materials is often promising in terms of resolving the problem of progressively deteriorating durability.

Predicting the development of corrosion processes in concrete structures over time and the consequences of this development is one of the current research topics. Available studies present proposals for a comprehensive description of the progressive corrosion of such structures based on knowledge of the development of corrosion processes of reinforcement in concrete and with reference to the provisions of standards, such as the work of Zybura (including [1]). In selected cases, data acquired using comprehensive monitoring systems are also used to holistically assess the changes occurring in certain structures [2]. In more recent theoretical models, the analysis of the impact of changes in the characteristics of a structure on its safety can be carried out based on theoretical models with the use of a cloud computing system [3-4]. In addition to the necessary investment in appropriate computational tools, the above methods for their calibration require, first of all, significant data resources obtained from surveys of the respective structures. The survey data can be implemented into a statistical model, which allows a reasonable assessment of the actual reliability level of the structure for both current and projected future loads [5]. Some works present methods for predicting the dynamics of the development of the effects of corrosion processes in structural elements based on a model of a given structure, and their results are confirmed by ongoing surveys of actual structures with respect to the condition of their structural elements [6]. As shown by some authors, the implementation of the results of detailed visual inspection and surveying of structural elements makes it possible to predict the load-bearing capacity and failure mode of the structural system, and some works show the high accuracy of such findings confirmed by real-scale experimental tests [7]. Each of the theoretical models for predicting the

1. WPROWADZENIE

Zmiany cech konstrukcji decydujących o możliwości jej wieloletniej eksploatacji bez ponoszenia nadmiernych kosztów związanych z naprawami są zależne od szeregu czynników i parametrów. Dynamika tych zmian jest konsekwencją rodzaju i jakości zastosowanych materiałów, zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, a także warunków eksploatacji i zakresu prac utrzymaniowych. Rozwój stosowanych technologii i możliwość doboru nowoczesnych materiałów przynosi niejednokrotnie zapowiedź rozwiązania problemu obniżenia trwałości, która zmienia się z biegiem czasu.

Przewidywanie rozwoju procesów korozji w konstrukcjach z betonu w czasie oraz skutków tego rozwoju jest jednym z aktualnych tematów badań. Dostępne opracowania przedstawiają propozycje kompleksowego opisu postępującej korozji takich konstrukcji w oparciu o wiedzę z zakresu rozwoju procesów korozyjnych zbrojenia w betonie oraz w odniesieniu do przepisów norm, jak prace Zybury (m.in. [1]). W wybranych przypadkach, do całościowej oceny zmian zachodzących w niektórych obiektach wykorzystuje się również dane pozyskiwane przy użyciu kompleksowych systemów monitoringu [2]. W nowszych modelach teoretycznych analiza wpływu zmian cech konstrukcji na jej bezpieczeństwo może być prowadzona w oparciu o modele teoretyczne osadzone w chmurze obliczeniowej [3-4]. Poza koniecznymi inwestycjami w odpowiednie narzędzia obliczeniowe powyższe metody dla ich kalibracji wymagają przede wszystkim znacznych zasobów danych, wynikających z badań obiektów. Dane badawcze mogą zostać zaimplementowane do modelu statystycznego, który pozwala na racjonalną ocenę rzeczywistego poziomu niezawodności obiektu zarówno w odniesieniu do aktualnych, jak i przewidywanych w przyszłości obciążeń [5]. Niektóre prace przedstawiają metody przewidywania dynamiki rozwoju skutków procesów korozyjnych w elementach konstrukcyjnych w oparciu o model danego obiektu, a ich wyniki znajdują potwierdzenie w prowadzonych badaniach obiektów rzeczywistych stanu elementów konstrukcji [6]. Jak pokazują niektórzy autorzy, implementacja wyników szczegółowych oględzin i badań elementów konstrukcji pozwala przewidywać nośność i sposób zniszczenia ustroju konstrukcyjnego, a niektóre prace pokazują wysoką dokładność takich ustaleń potwierdzoną badaniami w realnej skali [7]. Każdy z modeli teoretycznych pozwalających

effects of corrosion processes in concrete structures gains in its accuracy provided that data on the condition of structural elements, obtained from tests, are used.

The technology of constructing prestressed concrete suspension bridges is characterized by a very high degree of advanced solutions, especially in the field of protection of prestressing cables against corrosion. Bridge structures with a monolithic deck constructed of prestressed beams connected by a reinforced concrete slab have been erected for about 80 years, and their longevity is mostly unquestioned. External prestressing cables used in certain structures, placed in PEHD sheaths filled with cement grout, generally do not show any deficiency either. Introduced in the last decades of the 20th century, the solution of suspending the deck to the pylon using prestressing steel suspension cables is also planned in detail, and a set of materials that are relatively resistant to or protected from corrosion are used to ensure its long-term operation. This solution makes it possible to achieve significant bridge spans and has thus become very popular.

Observations of suspension and prestressed bridges made in various countries, however, give reason to believe that the service life of prestressing and suspension elements under adverse conditions may be insufficient compared to the expected service life of the structure. While the expected service life of bridges is 100 years, the repair works described in the literature and the replacement of suspension cables of certain structures are already being undertaken after about 20 years of operation. Thanks to the design rules specified in codes and regulations, this problem is much less a result of fatigue of materials in the structure [8]. Much more often, the problem of loss of initial performance is due to the development of damage and corrosion of external cables – both prestressing and suspension cables. Damage to external prestressing cables in a highway overpass [9], ribbon bridge support cables [10], or deck suspension cables [11] described in the literature is the result of improper selection of materials, poor workmanship during construction, or lack of proper maintenance and repair work. Investigations into the condition of suspension cables in structures that have been in service for less than 20 years often lead to decisions to repair or even completely replace them [12-13].

przewidywać skutki procesów korozyjnych w konstrukcjach z betonu zyskuje na swojej dokładności pod warunkiem zastosowania danych na temat stanu elementów konstrukcji, uzyskanych na podstawie badań.

Technologia budowy betonowych sprężonych mostów podwieszonych cechuje się bardzo wysokim stopniem zaawansowania rozwiązań, w szczególności w zakresie zabezpieczeń cięgien sprężających przed korozją. Obiekty mostowe o monolitycznym pomoście wykonanym ze sprężonych belek połączonych żelbetową płytą są wznoszone już od około 80 lat, a ich długowieczność nie przynosi przeważnie żadnych wątpliwości. Stosowane w niektórych obiektach kable sprężające zewnętrzne, umieszczone w osłonach PEHD wypełnionych zaczynem cementowym, co do zasady również nie wykazują żadnych niedoborów. Wprowadzone w ostatnich dekadach XX wieku rozwiązanie polegające na podwieszeniu pomostu do pylonu przy użyciu cięgien ze stali sprężającej również jest szczegółowo zaplanowane, a dla zapewnienia jego długotrwałej pracy wykorzystuje się zestaw materiałów stosunkowo odpornych na korozję lub przed nią chronionych. Rozwiązanie to daje możliwość osiągania znacznych rozpiętości przęseł mostów i dzięki temu stało się bardzo popularne.

Obserwacje podwieszonych oraz sprężonych obiektów mostowych dokonywane w różnych krajach dają jednak podstawy sądzić, że trwałość elementów sprężenia i podwieszenia w niesprzyjających warunkach może być niewystarczająca w porównaniu do przewidywanego okresu użytkowania obiektu. Podczas, gdy przewidywany okres eksploatacji obiektów mostowych wynosi 100 lat, opisywane w literaturze prace naprawcze oraz wymiana cięgien podwieszających niektórych obiektów podejmowane są już po około 20 latach eksploatacji. Dzięki określonym w przepisach normowych zasadom projektowania problem ten w znacznie mniejszym stopniu jest skutkiem zmęczenia materiałów w konstrukcji [8]. Znacznie częściej problem utraty początkowych parametrów jest wynikiem rozwoju uszkodzeń i korozji kabli zewnętrznych – zarówno sprężających jak i podwieszających. Opisywane w literaturze uszkodzenia zewnętrznych kabli sprężających w estakadzie drogowej [9], kabli nośnych mostu wstęgowego [10], czy kabli podwieszających pomost [11] są skutkami niewłaściwego doboru materiałów, złego wykonania prac w czasie budowy lub braku odpowiednich prac utrzymaniowych i naprawczych. Badania stanu

To confirm that the safety level of the structure remains unchanged, a thorough assessment of the technical condition of these elements is crucial.

Inspection of the condition of suspension and prestressing elements must be appropriately detailed and include, in addition to visual inspection of structural elements from the outside, testing of material samples collected from the structure. The evaluation should include a detailed visual inspection and material and strength testing of the suspension cables and all accessible components of the prestressing cables and anchorages: clamps and strands in active and passive anchorages, outer sheaths and their connections.

It is necessary to use numerous data and results from surveys and observations that go beyond standard periodic inspection procedures. The purpose of this paper is to present the results of a detailed visual, material and chemical survey of a selected suspension concrete bridge structure in Poland and to assess the impact of the observed processes on the current state and future state of structural elements relevant to the safety of the structure.

2. DESCRIPTION OF THE INSPECTED STRUCTURE AND ELEMENTS

A road bridge with a prestressed concrete deck was chosen for the analysis, which is a continuous four-span structure with a total length of 244 m, with the two longest spans suspended from a 51 m high reinforced concrete pylon. The deck's cross-section consists of two girders prestressed with cables along their entire length, and additional sectional cables anchored in the blisters located in the spans. The girders along their entire length are connected by a reinforced concrete slab. In addition, there are two types of cross-beams between the girders: in the two shorter spans, reinforced concrete cross-beams, located at an oblique angle in line with the axes of the adjacent supports (located at an angle of 71.4° to the axis of the structure), and in the longer (suspension) spans – cross-beams perpendicular to the main girders, extending beyond the outline of the deck, prestressed with cables along their entire length.

Suspension of structure to the pylons is performed by 20 suspension cables composed of parallel strands in a fan-shaped arrangement. Passive anchorages are located in the pylon's sockets, while stressing anchorages are based on cross-beams. A view of the structure is shown in Fig. 1.

cięgien podwieszających w obiektach eksploatowanych przez okres krótszy, niż 20 lat niejednokrotnie prowadzą do decyzji o ich naprawie, a nawet całkowitej wymianie [12-13]. Dla potwierdzenia, że poziom bezpieczeństwa konstrukcji nie jest zagrożony zmianami, kluczowa jest dokładna ocena stanu technicznego tych elementów.

Kontrola stanu elementów podwieszenia i sprężenia musi być odpowiednio szczegółowa i obejmować, poza oględzinami elementów konstrukcji z zewnątrz, także przeprowadzenie badań próbek materiałowych wyciętych z konstrukcji. Ocena powinna obejmować szczegółowe oględziny oraz badania materiałowe i wytrzymałościowe cięgien oraz wszystkich dostępnych elementów kabli sprężających i zakotwień: szczęk i splotów w zakotwieniach czynnych i biernych, osłon zewnętrznych oraz ich połączeń.

Konieczne jest wykorzystanie wielu danych i wyników badań i obserwacji, których zakres wykracza poza standardowe procedury przeglądów okresowych. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników szczegółowych badań wizualnych, materiałowych i chemicznych wybranego, podwieszonego obiektu mostowego z betonu w Polsce i oceny wpływu zaobserwowanych procesów na stan obecny oraz przyszły elementów konstrukcji istotnych dla bezpieczeństwa obiektu.

2. OPIS KONSTRUKCJI ORAZ ELEMENTÓW PODDANYCH BADANIOM

Do analizy wybrano most drogowy o pomoście z betonu sprężonego, który jest ustrojem ciągłym czteroprzęsłowym o całkowitej długości 244 m, w dwóch najdłuższych przęsłach podwieszonym do żelbetowego pylonu o wysokości 51 m. Przekrój poprzeczny pomostu składa się z dwóch dźwigarów sprężonych kablami na całej długości, oraz dodatkowymi kablami odcinkowymi, kotwionymi w bosażach usytuowanych w przęsłach. Dźwigary na całej długości są połączone płytą żelbetową. Ponadto pomiędzy dźwigarami występują dwa rodzaje poprzecznic: w dwóch przęsłach krótszych poprzecznice żelbetowe, usytuowane w skosie zgodnym z osiami sąsiadujących podpór (usytuowanych pod kątem 71,4° do osi obiektu), oraz w przęsłach dłuższych – podwieszonych – poprzecznice ze wspornikami wystającymi poza obrys pomostu, sprężone kablami na całej długości, prostopadłe do dźwigarów głównych.

The structure includes typical structural solutions. As one of the group of structures located on rivers in mountainous areas, it is moderately exposed to environmental influences that can lead to corrosion of its various parts. Both the geometry of the various elements of the structure and the technological solutions used comply with the standards for this type of structure, especially the size of the support elements for the anchorages and the protection elements at the cable anchorages. Among all the structural elements surveyed in the structure under consideration, observations and surveys particularly focused on the prestressing-steel elements – suspension cables and cables prestressing the beams. Due to the structure's design, corrosion changes occurring in the suspension and prestressing elements of the deck may cause the reduction of the structure's safety reserve, and thus finally its durability. Thus, the suspension cables – both along their entire length and in the anchorage zones – as well as the anchorage zones of the cables prestressing the main girders and cross-beams were subjected to detailed visual inspection and surveying. The surveys included visual observation, photographic documentation, disassembly or local uncovering of the surveyed elements, sampling the materials for conducting the laboratory tests, and evaluation of their results. In the following part of the paper authors present the types of conducted tests and the results of observations made for each element.

3. INSPECTION AND EVALUATION OF THE CONDITION OF EXTERNAL ELEMENTS OF INTERNAL PRESTRESSING IN THE STRUCTURE – BONDED CABLES

3.1. PRESTRESSING CABLES IN THE MAIN GIRDERS AND THEIR SURROUNDINGS

The prestressing cables used in the load-bearing structure under study are classic bonded cables, placed in steel sheaths filled with cement grout after tensioning the suspension cables. Correctly performed ducts grouting ensures both adhesion and corrosion protection of the suspension cables along their length. In the anchorage zone of prestressing cables, a typical common solution is to completely cover them with a layer of tight concrete.

Podwieszenie obiektu do pylonu stanowi 20 cięgien złożonych ze splotów równoległych w układzie wachlarzowym. Zakotwienia bierne są umieszczone w gniazdach pylonu, natomiast zakotwienia czynne są oparte na wspornikach poprzecznic. Widok obiektu jest przedstawiony na Rys. 1.

Fig. 1. View of the structure
Rys. 1. Widok obiektu

Obiekt zawiera typowe rozwiązania konstrukcyjne. W grupie obiektów usytuowanych nad rzekami w obszarach górskich, jest w stopniu przeciętnym narażony na wpływy otoczenia mogące prowadzić do korozji jego poszczególnych części. Zarówno geometria poszczególnych elementów konstrukcji, jak i zastosowane rozwiązania technologiczne odpowiadają standardom dla tego typu konstrukcji, w szczególności wielkość elementów wsporczych dla zakotwień oraz elementy zabezpieczenia przy zakotwieniach want. Wśród wszystkich badanych elementów konstrukcyjnych rozpatrywanego obiektu obserwacje i badania dotyczyły w szczególności elementów ze stali sprężającej – cięgien podwieszenia oraz kabli sprężających belki. Z uwagi na konstrukcję obiektu, zmiany korozyjne zachodzące w elementach podwieszenia oraz sprężenia pomostu mogą mieć wpływ na obniżanie się zapasu bezpieczeństwa konstrukcji, a przez to docelowo na jej trwałość. Szczegółowym oględzinom i badaniom poddano zatem cięgna podwieszające – zarówno na całej ich długości, jak i w strefach zakotwień, a także strefy zakotwień kabli sprężających dźwigary główne oraz poprzecznice. Badania obejmowały obserwacje wizualne, dokumentację fotograficzną, demontaż lub lokalne odsłonięcie badanych elementów, pobranie materiałów do badań laboratoryjnych oraz ich przeprowadzenie, a także

In the structure surveyed, the longest prestressing cables in the main girders are anchored on the face of the beams within the support cross-beam member and covered with a protective layer of concrete. This method provides long-lasting durability, as long as the protecting concrete is not subject to destruction by carbonation or chloride corrosion, caused by chlorides from pavement de-icing. In order to examine this zone, a visual assessment was performed, during which significant wetting of the concrete in the lower part of the cross-beam was found, as well as developing degradation in this area. Therefore, a representative number of concrete samples were taken from the lower part of the girder (adjacent to the structural bearing) for chemical testing to determine the *pH* value, chloride, sulfate and nitrate content. The sampling location is shown in Fig. 2. Samples for chemical testing were taken in the form of chipped blocks of concrete and drillings. The results obtained are shown in Table 1.

a)

b)

Fig. 2. Support zone of the girder on the bearing (a), edge of the girder with material sampling location for testing (b)
Rys. 2. Strefa podparcia dźwigara na łożysku (a), krawędź dźwigara z miejscem pobrania materiału do badań (b)

ocenę ich wyników. W dalszej części pracy przedstawiono sposób przeprowadzenia badań i wyniki obserwacji poczynionych dla poszczególnych elementów.

3. BADANIA I OCENA STANU ZEWNĘTRZNYCH ELEMENTÓW SPRĘŻENIA WEWNĘTRZNEGO W KONSTRUKCJI – KABLE Z PRZYCZEPNOŚCIĄ

3.1. KABLE SPRĘŻAJĄCE W DŹWIGARACH GŁÓWNYCH I ICH OTOCZENIE

Kable sprężające zastosowane w badanym ustroju nośnym to klasyczne kable z przyczepnością, umieszczone w stalowych osłonkach wypełnionych po naciągu cięgien iniekcją cementową. Poprawnie wykonana iniekcja kanałów zapewnia zarówno przyczepność, jak i ochronę przeciwkorozyjną cięgien na ich długości. W strefie zakotwień kabli sprężających typowym, stosowanym powszechnie rozwiązaniem jest ich całkowite osłonięcie warstwą szczelnego betonu.

W obserwowanym obiekcie najdłuższe kable sprężające w dźwigarach głównych są kotwione na czole belek w obrębie poprzecznicy podporowej i pokryte zabezpieczającą warstwą betonu. Ten sposób zapewnia długoletnią trwałość, o ile zabezpieczający beton nie podlega destrukcji wskutek karbonatyzacji lub korozji chlorkowej, wywołanej chlorkami pochodzącymi z odladzania jezdni. W celu oceny tej strefy wykonano ocenę wizualną, podczas której stwierdzono znaczne zamakanie betonu w dolnej części poprzecznicy, a także rozwijającą się jego degradację w tym obszarze. W związku z tym z dolnej części dźwigara (w sąsiedztwie łożyska konstrukcyjnego) do badań chemicznych pobrano reprezentatywną liczbę próbek betonu w celu określenia odczynu, zawartości chlorków, siarczanów i azotanów. Miejsce pobrania próbek pokazano na Rys. 2. Próbki do badań chemicznych pobrano w postaci odłupanych bryłek betonu i zwiercin. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w Tabl. 1.

Table 1. Results of chemical tests of concrete samples
Tablica 1. Wyniki badań chemicznych pobranych próbek betonu

Type of material tested Rodzaj badanego materiału	Sampling depth [cm] Głębokość pobrania próbki	*pH*[*)]	Hausman criterion[**)] [14] Kryterium Hausmana[**)] [14]	Sulphates Siarczany	Chlorides[***)] Chlorki[***)]	Nitrates Azotany
			[Cl–]/[OH–]	[%] d.m. / m.s.		
Drillings Zwierciny	0-4	12.10	0.94	0.31	2.21	0.07
Chipped block of concrete Odłupane bryłki betonu	up to about 1.5 do około 1.5	11.28	4.38	1.28	1.02	0.03

Designations / Oznaczenia:

*) – minimum *pH* value of reinforced concrete 11.8 / minimalna wartość *pH* betonu zbrojonego 11,8,

**) – above the value of 0.6 there is a real risk of initiation of corrosion of steel / powyżej wartości 0,6 istnieje realne ryzyko inicjacji korozji stali,

***) – the permissible chloride content in prestressed concrete is 0.15% by weight of binder for prestressed concrete, 0.4% for reinforced concrete and 1% for unreinforced concrete, respectively / dopuszczalna zawartość chlorków w betonie sprężonym wynosi odpowiednio dla betonu sprężonego 0,15% masy spoiwa, dla betonu zbrojonego 0,4% i dla betonu niezbrojonego 1%.

Chemical testing of samples taken as chipped blocks of concrete showed that the concrete in the surface layers, adjacent to the reinforcing steel, has completely degraded and does not provide any protection for the reinforcement, but on the contrary is an aggressive environment for it. Similarly, the results of chemical tests on concrete samples taken from the beam above the bearing in the form of drillings showed that although the *pH* value was high, at the level of 12, due to the very high chloride content of 2.2% by weight of the binder, the concrete lost its reinforcement protective properties. This is confirmed by Hausmans criterion [14] defining the relationship between reaction and chloride ion content, whose value is 0.94 with an acceptable value of 0.6. So, despite the high *pH*, the concrete has lost the protective abilities and the steel can corrode. As a result of corrosion processes, the cross-sectional area of reinforcing bars decreases, and thus the load-bearing capacity of structural elements decreases [6]. In addition, the corrosion products of steel are many times larger in volume than the steel itself. This causes the concrete splitting from the reinforcing steel in the form of easy-to-sample whole fragments of concrete that are referred to herein as chipped blocks of concrete. This process leads to exposure of the reinforcement and consequently accelerated corrosion. Importantly, chlorides have the ability to migrate easily in the concrete matrix and move deep into the structural element without much resistance, thus becoming a real threat to steel bars embedded at a greater depth from the concrete surface. In the analyzed case, damage to the expansion joint, being the localization of water leakage from the pavement

Badania chemiczne próbek pobranych w formie odłupanych bryłek betonu wykazały, że beton w warstwach powierzchniowych, otulający bezpośrednio stal zbrojeniową, uległ całkowitej degradacji i nie stanowi żadnej ochrony dla zbrojenia, a wręcz przeciwnie jest dla niego środowiskiem agresywnym. Podobnie, wyniki badań chemicznych próbek betonu pobranego z belki nad łożyskiem w postaci zwiercin wykazały, że wprawdzie odczyn jest wysoki, na poziomie 12, jednakże ze względu na bardzo wysoką zawartość chlorków wynoszącą 2,2% masy spoiwa beton utracił właściwości ochronne względem zbrojenia. Potwierdza to kryterium Hausmana [14] ujmujące zależność pomiędzy odczynem a zawartością jonów chlorkowych, którego wartość wynosi 0,94 przy dopuszczalnej wartości 0,6. Zatem pomimo wysokiego *pH* beton nie stanowi ochrony względem stali zbrojeniowej i stal może korodować. W efekcie procesów korozji przekrój prętów zbrojeniowych zmniejsza się, a tym samym maleje nośność elementów konstrukcyjnych [6]. Ponadto, produkty korozji stali mają wielokrotnie większą objętość niż sama stal. Powoduje to odspajanie betonu od stali w postaci łatwych do pobrania całych fragmentów betonu nazywanych tu odłupanymi bryłkami betonu. Proces ten prowadzi do odsłonięcia zbrojenia i w konsekwencji przyspieszenia korozji. Co istotne, chlorki mają zdolność do łatwej migracji w matrycy betonowej i bez większego oporu przemieszczają się w głąb elementu konstrukcyjnego, stając się tym samym realnym zagrożeniem dla stali umieszczonej na większej głębokości od powierzchni betonu. W przedmiotowym przypadku uszkodzenie dylatacji stanowiące miejsce przecieku wody z powierzchni

surface toward bridge elements such as prestressed concrete girders and bearings (Fig. 2) directly caused severe degradation of these bridge structural components.

3.2. CABLES PRESTRESSING CROSS-BEAMS AND THEIR SURROUNDINGS

The prestressed concrete cross-beams extend beyond the main girders and the outline of the sidewalk overhangs (Fig. 1). Since they are located below the level of the pavement, a brine mist, generated by the movement of vehicles on the surface sprayed with de-icing agents, falls on their surface during the winter. However, visual inspection revealed no visible zones of concentrated streaking, confirming that the geometry of these elements was properly shaped. The entire surface of the concrete cross-beam supports outside the sidewalks outline is evenly exposed to the environment.

The chemical tests included concrete sampled from four prestressed concrete cross-beam supports. Samples were taken in the form of drillings from two layers, i.e. from the surface layer exposed to direct environmental influences (depth up to 2.0 cm) and from a slightly deeper layer (from 2.0 to 5.0 cm). An example drilling sampling location is shown in Fig. 3, while the results obtained are shown in Table 2.

jezdni w kierunku elementów mostu takich jak dźwigary nośne z betonu sprężonego oraz łożyska (Rys. 2) spowodowało bezpośrednio silną degradację tych elementów konstrukcji mostowej.

3.2. KABLE SPRĘŻAJĄCE POPRZECZNICE I ICH OTOCZENIE

Poprzecznice z betonu sprężonego wystają poza dźwigary główne oraz obrys kap chodnikowych (Rys. 1). Ponieważ są usytuowane poniżej poziomu jezdni, na ich powierzchnię w czasie zimy opada mgła solankowa, generowana przez ruch pojazdów po nawierzchni spryskiwanej środkami odladzającymi. W trakcie oględzin nie stwierdzono jednak widocznych stref koncentracji zacieków, co potwierdza odpowiednie ukształtowanie geometrii tych elementów. Cała powierzchnia wsporników betonowych poprzecznic poza obrysem chodników jest równomiernie narażona na wpływ otoczenia.

Badaniami chemicznymi objęto beton pobrany z czterech wsporników poprzecznic z betonu sprężonego. Próbki pozyskano w formie zwiercin z dwóch warstw, tj. z warstwy powierzchniowej narażonej na bezpośrednie wpływy środowiskowe (głębokość do 2,0 cm) oraz z warstwy nieco głębszej (od 2,0 do 5,0 cm). Przykładowe miejsce pobrania zwiercin pokazano na Rys. 3, natomiast uzyskane wyniki w Tabl. 2.

Table 2. Results of chemical tests of concrete samples taken
Tablica 2. Wyniki badań chemicznych pobranych próbek betonu

Anchorage node Węzeł zakotwienia	Sampling depth [cm] Głębokość pobrania próbki	*pH**)	Hausman criterion**) [14] Kryterium Hausmana**) [14]	Sulphates Siarczany	Chlorides***) Chlorki***)	Nitrates Azotany
			[Cl–]/[OH–]	[%] d.m. / m.s.		
D1	0-2	12.0	0.06	none	0.07	none
D1	2-5	12.1	0.05	0.09	0.07	none
G2	0-2	12.1	0.06	0.09	0.08	0.03
G2	2-5	12.1	0.06	0.08	0.07	0.03
G3	0-2	12.1	0.05	0.08	0.07	none
G3	2-5	12.1	0.05	0.11	0.03	none
D5	0-2	12.1	0.03	0.16	0.05	0.05
D5	2-5	12.2	0.02	0.09	0.03	0.03

Designations / Oznaczenia:

*) – minimum *pH* value of reinforced concrete 11.8 / minimalna wartość *pH* betonu zbrojonego 11,8,

**) – above the value of 0.6 there is a real risk of initiation of corrosion of steel / powyżej wartości 0,6 istnieje realne ryzyko inicjacji korozji stali,

***) – the permissible chloride content in prestressed concrete is 0.15% by weight of binder for prestressed concrete, 0.4% for reinforced concrete and 1% for unreinforced concrete, respectively / dopuszczalna zawartość chlorków w betonie sprężonym wynosi odpowiednio dla betonu sprężonego 0,15% masy spoiwa, dla betonu zbrojonego 0,4% i dla betonu niezbrojonego 1%.

Fig. 3. Location of drilling sampling location for chemical testing of concrete from the support
Rys. 3. Miejsce pobrania próbek zwiercin do badań chemicznych betonu ze wspornika

Chemical tests of the samples taken showed that the concrete embedded in the cross-beam supports has a high *pH* of 12 and low chloride content. Therefore, conditions conducive to the initiation of corrosion of reinforcing and prestressing steel were not found at the time of the survey. However, it should be noted that the strong degradation of protective coatings on the concrete surface promotes leaching of the binder, which leads to a gradual decrease in *pH*. In addition, unprotected concrete is exposed to chlorides from salt spray sprayed at pavement level in winter. It should be added that the permissible chloride content for prestressed concrete is 0.15% by weight of the binder, so the demonstrated chloride content in terms of this limit is already high and can become dangerous unless protective coatings are reapplied.

The prestressing cables in the cross-beams run across the entire length of these elements. Given the location of the anchorage of the suspension cables, the effectiveness of prestressing in the initial sections of these cables – at the ends of the cross-beams – is crucial to the safety and durability of the structure. The resulting need for adequate protection of cable anchorages is an important criterion that requires careful verification.

Anchorages of cables prestressing the cross-beams are located on the faces of the beams. The standard solution used for such anchorage locations is to place them in niches formed in the structure before concreting. These niches are filled with an airtight concrete mixture to protect anchorages and cable ends from corrosion after prestressing and injection of cable ducts. In the analyzed bridge structure, a different solution was used. Anchorage blocks are flush with the cross-beams face. Anchorages including anchorage clamps and end sections of cable strands extend beyond the faces of cross-beams. To protect these elements,

Badania chemiczne pobranych próbek wykazały, że beton wbudowany we wspornikach poprzecznic charakteryzuje się wysokim poziomem odczynu *pH* równym 12 i niską zawartością chlorków. W związku z tym w chwili badania nie stwierdzono warunków sprzyjających inicjacji korozji stali zbrojeniowej oraz sprężającej. Należy jednak zwrócić uwagę, że silna degradacja powłok ochronnych na powierzchni betonu sprzyja ługowaniu spoiwa, co prowadzi do stopniowego obniżenia *pH*. Ponadto, niezabezpieczony beton narażony jest na chlorki pochodzące z mgły solankowej rozpylanej zimą na poziomie jezdni. Trzeba dodać, że dopuszczalna zawartość chlorków dla betonu sprężonego wynosi 0,15% masy spoiwa, zatem wykazana zawartość chlorków w aspekcie tej wartości granicznej jest już wysoka i może stać się niebezpieczna, o ile nie zostaną naniesione na nowo powłoki ochronne.

Kable sprężające w poprzecznicach przebiegają na całej długości tych elementów. Z uwagi na lokalizację mocowania zakotwień cięgien podwieszających, efektywność sprężenia w początkowych odcinkach tych kabli – na końcach poprzecznic – ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i trwałości obiektu. Wynikająca z tego kryterium konieczność odpowiedniej ochrony zakotwień kabli jest istotnym elementem wymagającym dokładnej weryfikacji.

Zakotwienia kabli sprężających poprzecznice oparte są na czołach belek. Standardowym rozwiązaniem stosowanym dla takiej lokalizacji zakotwień jest umieszczanie ich w niszach ukształtowanych w konstrukcji przed betonowaniem. Nisze te po zakończeniu sprężania i iniekcji kanałów są wypełniane szczelną mieszanką betonową, której zadaniem jest ochrona zakotwień i końcówek kabli przed korozją. W poddanym analizie obiekcie mostowym zastosowano inne rozwiązanie. Bloki oporowe zakotwień są zlicowane z powierzchnią czołową poprzecznic. Zakotwienia wraz ze szczękami kotwiącymi oraz końcowymi odcinkami splotów kabli wystają poza czoła poprzecznic. W celu ochrony tych elementów zastosowano stalowe kołpaki o kształcie walca mocowane do bloku oporowego kabla. Kołpaki są ocynkowane, posiadają otwory wentylacyjne, niektóre z nich są nieszczelne w miejscach

cylindrical steel caps attached to the cable anchorage block were used. The caps are galvanized, have vents; some are leaking at the connection between the bottom and the cylindrical surface, and, most significantly, are hollow. Once this was discovered, a decision was made to inspect the caps to determine the condition of the anchorages and cable ends in the various cross-beams. Due to repeated observations, detailed visual inspection was completed at four cable anchorage nodes. Example photographs of anchorages on the face of the cross-beam are shown in Fig. 4.

The results of the observations confirmed that the inside of the anchorage caps of the prestressing cables is not filled with any protective material, while the ends of the cable strands are protected with cementitious material. Some caps were also found to have leaks at the welds, causing water to seep in and wetting the material protecting the cable ends. A very important result of the observation is the finding of the presence of corrosion processes on the ends of the strands of prestressing cables (Fig. 5). This finding prompted chemical testing of the cementitious material protecting the strand ends. The results showed that the *pH* was low, i.e. at 11.3. This value is clearly below the value required for reinforced and prestressed concrete, i.e. 11.8 In the situation found, with the presence of moisture with simultaneous low *pH* of the protective material, there will be the initiation and development of corrosion of the prestressing reinforcement, which poses a significant threat to the durability and safety of the structure.

połączenia dna z powierzchnią walcową, a co najbardziej istotne – są puste. Po stwierdzeniu tego faktu podjęto decyzję o przeglądzie kołpaków w celu określenia stanu zakotwień i końcówek kabli w różnych poprzecznicach. Z uwagi na powtarzające się obserwacje szczegółowe oględziny zakończono na czterech węzłach zakotwienia kabli. Przykładowe fotografie zakotwień na czole poprzecznicy przedstawiono na Rys. 4.

Wyniki obserwacji potwierdziły, że wnętrza kołpaków zakotwień kabli sprężających nie są wypełnione żadnym materiałem ochronnym, natomiast końcówki splotów kabli zabezpieczone są materiałem cementowym. Stwierdzono również, że niektóre kołpaki posiadają nieszczelności na spawach, co powoduje przedostawanie się wody do ich wnętrza i zamakanie materiału zabezpieczającego końcówki kabli. Bardzo istotnym wynikiem obserwacji jest stwierdzenie obecności procesów korozji końcówek splotów kabli sprężających (Rys. 5). W związku z tym wykonano badania chemiczne cementowego materiału zabezpieczającego końcówki splotów. Wyniki wykazały, że odczyn *pH* jest niski tj. na poziomie 11,3. Jest to wartość leżąca wyraźnie poniżej wartości wymaganej dla betonu zbrojonego i sprężonego tj. 11,8. W stwierdzonej sytuacji, przy obecności zawilgocenia przy równocześnie niskim odczynie materiału zabezpieczającego będzie dochodziło do inicjacji i rozwoju korozji zbrojenia sprężającego, co stanowi istotne zagrożenie dla trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji.

a)

b)

Fig. 4. View of the cross-beam support: a) with caps, b) after removing the caps
Rys. 4. Widok wspornika poprzecznicy: a) z kołpakami, b) po zdjęciu kołpaków

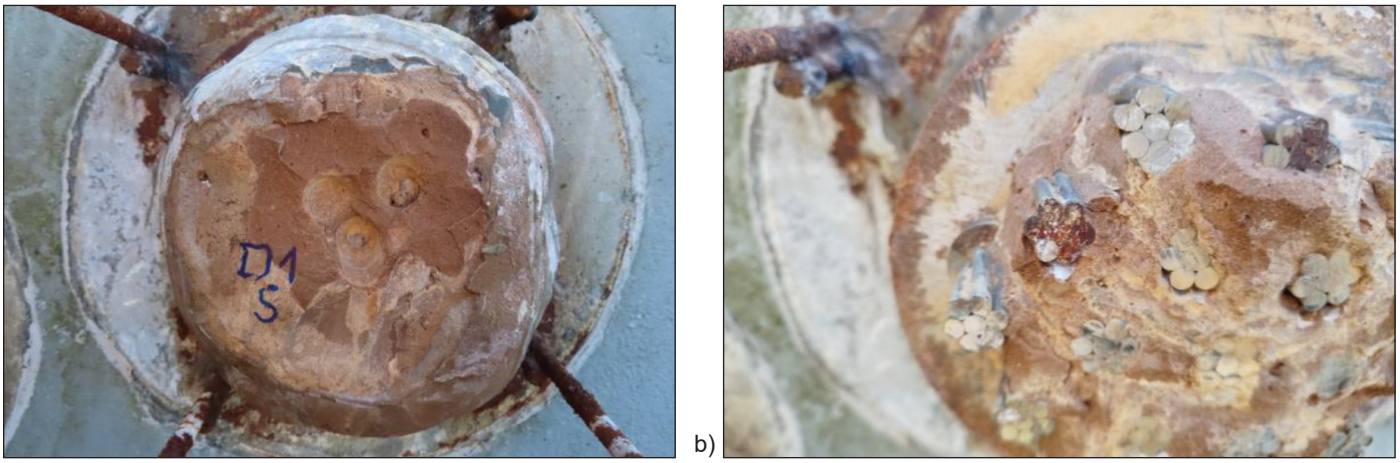


Fig. 5. Sampling location of cementitious material protecting the ends of the prestressing cable strands in the beam (a) and the exposed ends of the prestressing cable strands (b)
Rys. 5. Miejsce pobrania próbki materiału cementowego zabezpieczającego końcówki splotów kabli sprężających w belce (a) oraz odsłonięte końcówki splotów kabli sprężających (b)

4. INSPECTION AND ASSESSMENT OF THE CONDITION OF SUSPENSION CABLES INCLUDING ANCHORAGES

Visual inspection of the suspension cables of the analyzed structure was carried out to the extent of 6 of the 20 load-bearing elements. The inspection program covered a scope comparable to the "Operation and Maintenance Manual for the structure suspension system", prepared by the suspension contractor. The protective pipes were visually inspected along their entire length, using access by means of pneumatic basket lifts, thus avoiding the construction of specialized self-propelled equipment, such as that described in [15]. Visual inspection was performed on the anchorage and protective caps from the outside, followed by disassembly of selected caps, visual inspection of the degree to which the spaces inside the caps were filled with a permanently plastic composition, inspection of the condition of this composition, condition of the anchorage surface, ends of the strands and clamps anchoring the strands in the anchorage. The number of elements surveyed was adjusted according to the results obtained, as no defects were found and the condition of the suspension elements evaluated is very good.

During observation of the inside of the protective caps of the lower anchorages of the suspension cables, it was found that the filling composition has not changed its form and still completely fill the space inside these covers (Fig. 6). As a study using *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) has shown, its spectrum in this

4. BADANIA I OCENA STANU CIĘGIEN PODWIESZAJĄCYCH WRAZ Z ZAKOTWIENIAMI

Oględziny cięgien podwieszających analizowanego obiektu były prowadzone w zakresie obejmującym 6 z 20 elementów nośnych. Przyjęty program badań objął zakres porównywalny z „Instrukcją eksploatacji i konserwacji systemu podwieszenia konstrukcji", opracowaną przez wykonawcę podwieszenia. Oględzinom poddano rury osłonowe na całej długości, wykorzystując dostęp przy użyciu zwyżek, co pozwoliło uniknąć budowania specjalistycznego sprzętu samojezdnego, jak na przykład opisany w [15]. Przeprowadzono oględziny zakotwień i kołpaków osłonowych od zewnątrz, demontaż wybranych kołpaków, oględziny stopnia wypełnienia przestrzeni wewnątrz kołpaków kompozycją trwale plastyczną, stan tej kompozycji, stan powierzchni zakotwienia, końcówek splotów oraz szczęk kotwiących sploty w zakotwieniu. Liczbę badanych elementów dostosowano do uzyskiwanych wyników, gdyż nie stwierdzono żadnych ubytków, a stan ocenianych elementów podwieszenia jest bardzo dobry.

W czasie obserwacji wnętrza kołpaków ochronnych dolnych zakotwień cięgien podwieszających stwierdzono, że kompozycja wypełniająca nie zmieniła swojej postaci i nadal wypełnia całkowicie przestrzeń wewnątrz tych osłon (Rys. 6). Jak wykazało badanie w wykorzystaniem spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (ang. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, FTIR), jej widmo w tym zakresie fal pozostaje w zgodzie z widmem

wavelength range is in good agreement with the reference spectrum. After detailed inspection of the caps themselves, it was confirmed that both their inner and outer surfaces, thanks to the properly applied galvanic coating, show no damage or corrosion, and the coating itself is not visibly altered. Some of the caps are slightly soiled, but this does not affect their durability.

Inspections of the protective pipes of the suspension cables were intended to show whether changes occur in the coating material due to 14 years of atmospheric and solar exposure. An FTIR determination of the infrared spectrum was made on the material samples taken, which confirmed the negligible effect of operation on the material (Fig. 7).

Inspection of the inside of the suspension cable sheath between adjacent sections with anchorages was made for two suspension cables. In the first case, a localized crack of the suspension cable sheath around the perimeter, already observed before the test, was used near the crossbeam. As a result of the crack, the sheath was open for an extended period of time allowing the incoming water to penetrate the inside of the pipe during rainy weather. Observations with the endoscope showed significant dirt on the inside of the sheath, as well as traces of arachnid activity (Fig. 8). In addition, attention was drawn to the visible ends of strands in this zone.

wzorcowym. Po szczegółowych oględzinach samych kołpaków potwierdzono, że zarówno ich wewnętrzna, jak i zewnętrzna powierzchnia, dzięki prawidłowo naniesionej powłoce galwanicznej, nie wykazuje żadnych uszkodzeń, ani korozji, a sama powłoka nie ulega widocznym zmianom. Niektóre z kołpaków są nieznacznie zabrudzone, jednak nie ma to wpływu na ich trwałość.

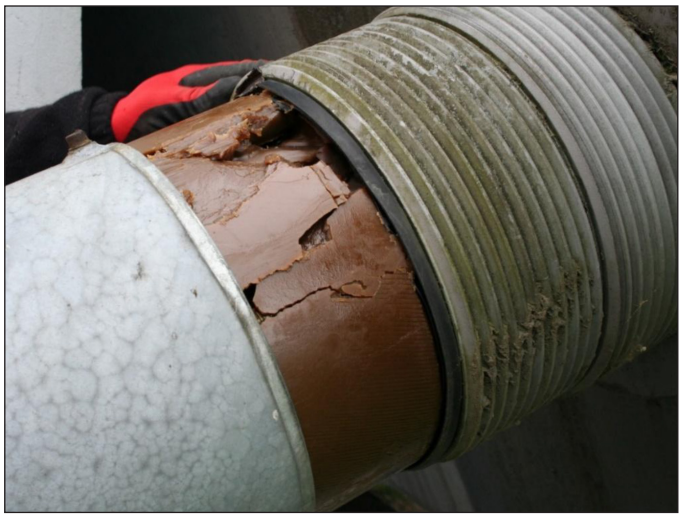


Fig. 6. Exposed cap filling (permanently plastic material)
Rys. 6. Odsłonięte wypełnienie kołpaka (materiał trwale plastyczny)

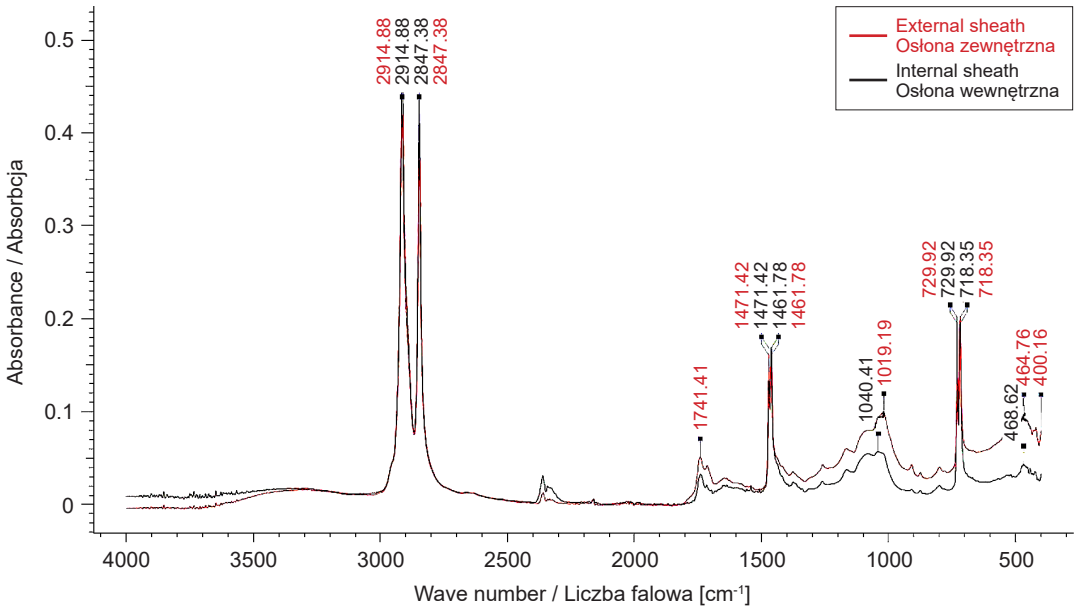
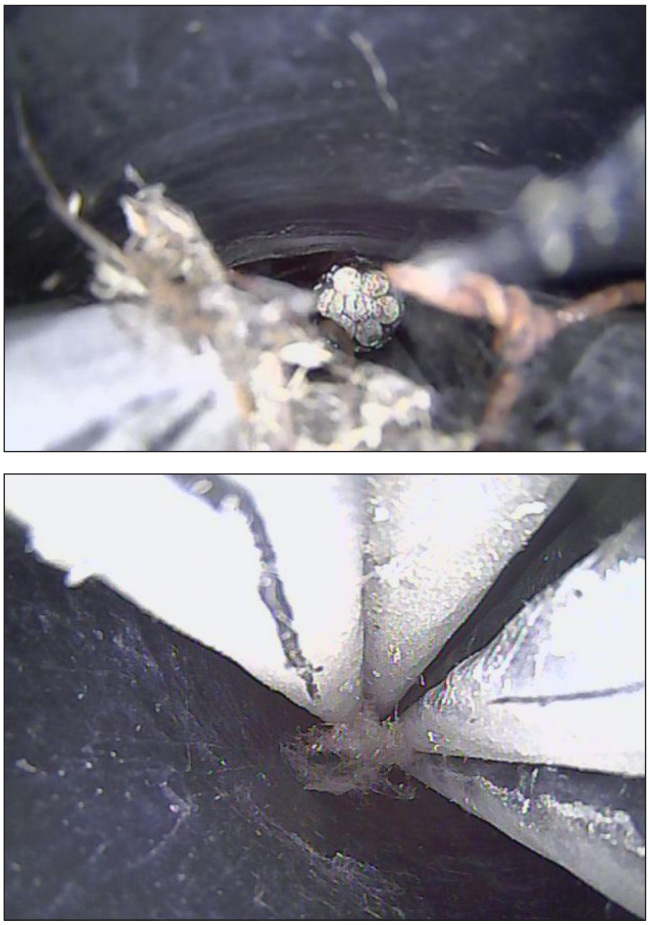


Fig. 7. Absorption spectrum of radiation versus wavelength (FTIR) obtained for the outer (marked in red) and inner (marked in black) surface of the PEHD pipe at anchorage node D1
Rys. 7. Widmo absorpcji promieniowania w funkcji długości fali (FTIR) uzyskane dla zewnętrznej (kolor czerwony) i dla wewnętrznej (kolor czarny) powierzchni rury PEHD w węźle zakotwienia D1



a)

b)

Fig. 8. Inside of the sheath in the vicinity of the crack: visible organic debris, corroded wires and the tip of the trimmed strand (a), traces of arachnid activity (b)
Rys. 8. Wnętrze osłonki w sąsiedztwie pęknięcia: widoczne zanieczyszczenia organiczne, skorodowane druty i końcówka przyciętego splotu (a), ślady aktywności pajęczaków (b)

Visual inspection of the inside of the suspension cable sheath, which was free of mechanical damage in the form of cracks or scratches, conducted through an inspection hole specially made for this purpose (Fig. 9), confirmed the absence of any visible dirt in this zone. Exposed sections of strands in individual sheaths are in very good condition. Observations confirm that while there is no damage to its outer sheath along the length of the suspension cable, any reduction in the durability of the suspension may occur essentially in the zone adjacent to the anchorage, where there are a number of connections of the various elements of the protective element.

A survey of the zone surrounding the passive anchorage showed that all surrounding elements, as well as the

Badania rur osłonowych cięgien podwieszających miały na celu wykazanie, czy w materiale osłony następują zmiany wynikające z 14-letniego oddziaływania atmosfery i nasłonecznienia. Na pobranych próbkach materiału dokonano określenia metodą FTIR widma w podczerwieni, które potwierdziło nikły wpływ eksploatacji na materiał (Rys. 7).

Badania wnętrza osłonki cięgna podwieszającego pomiędzy odcinkami sąsiadującymi z zakotwieniami wykonano dla dwóch cięgien. W pierwszym z przypadków wykorzystano zlokalizowane w pobliżu poprzecznicy pęknięcie osłony cięgna podwieszającego na całym obwodzie, zaobserwowane już przed przystąpieniem do badań. Wskutek pęknięcia osłona była otwarta przez dłuższy czas od strony napływu wody w czasie deszczu. Obserwacje przy użyciu endoskopu wykazały znaczne zabrudzenie wnętrza osłony, a także ślady aktywności pajęczaków (Rys. 8). Dodatkowo, uwagę zwróciły widoczne w tej strefie końcówki splotów.

Oględziny wnętrza osłony cięgna podwieszającego, pozbawionej uszkodzeń mechanicznych w postaci pęknięć czy rys, przeprowadzone przez specjalnie wykonany w tym celu otwór rewizyjny (Rys. 9), potwierdziły brak jakichkolwiek widocznych zabrudzeń tej strefy. Odsłonięte odcinki splotów w indywidualnych osłonkach są w bardzo dobrym stanie. Obserwacje potwierdzają, że o ile na długości cięgna podwieszającego nie występują uszkodzenia jej osłony zewnętrznej, to ewentualne obniżenie trwałości podwieszenia może mieć miejsce zasadniczo w strefie sąsiadującej z zakotwieniem, gdzie występuje szereg połączeń poszczególnych elementów zabezpieczenia ochronnego.

Badania strefy otaczającej zakotwienia bierne wykazały, że zarówno wszystkie elementy otaczające, jak i samo zakotwienie z kołpakiem ochronnym zachowują bardzo dobry stan i nie wykazują żadnych uszkodzeń ani zmian korozyjnych. Stan kompozycji wypełniającej kołpak, kołpaka wraz z warstwami ochronnymi, a także stalowych i betonowych elementów otaczających zakotwienie bierne nie budzą żadnych zastrzeżeń. Jedyne zaobserwowane zmiany to zmatowienie wywołane skredowaniem powłok malarskich na elementach stalowych, co po 14 latach pracy jest całkowicie typowym skutkiem operacji promieni UV oraz kontaktu z wodą opadową i powietrzem (Rys. 10).

Podsumowując, w ramach oceny aktualnego stanu podwieszenia obiektu otrzymano w większości obserwacje pozytywne, poczyniono jednak również kilka obserwacji

anchorage itself with the protective cap, remain in very good condition and show no damage or corrosion changes. The condition of the composition filling the cap, the cap with its protective layers, as well as the steel and concrete elements surrounding the passive anchorage, raise no objections. The only changes observed were dulling caused by chalking of paint coatings on steel parts, which after 14 years of service is an entirely typical effect of UV rays and contact with rainwater and air (Fig. 10).

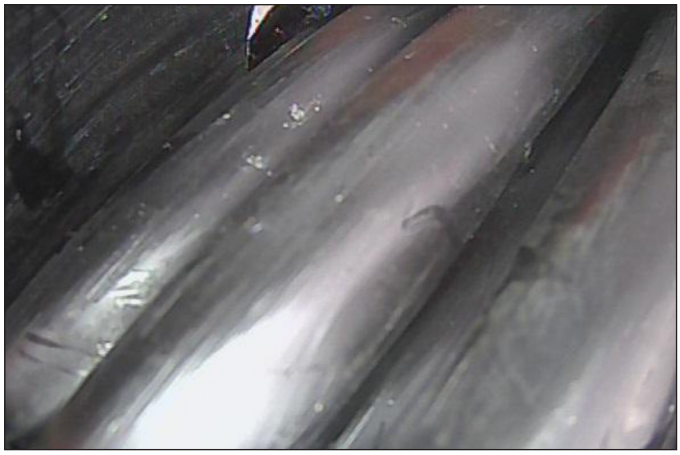
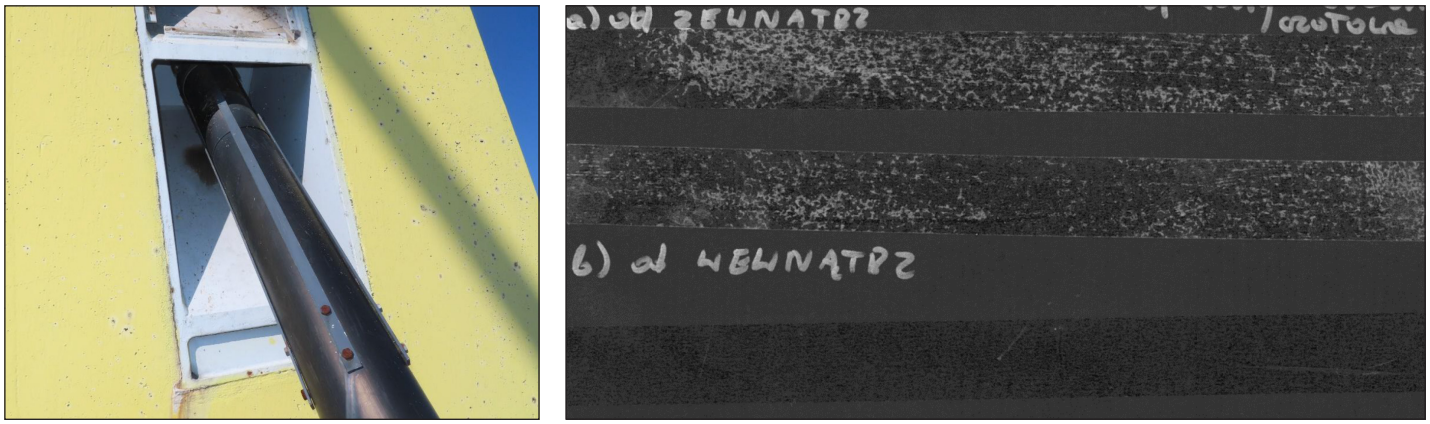


Fig. 9. View of the inside of the suspension cable sheath through the inspection hole
Rys. 9. Widok wnętrza osłonki cięgna podwieszającego przez otwór rewizyjny

o charakterze negatywnym. Pierwszą z nich jest obecność pęknięć zewnętrznych osłonek PEHD w dwóch spośród 20 cięgien podwieszających. Powstałe nieszczelności pozwalają na dostęp powietrza, wilgoci, zanieczyszczeń oraz czynników biologicznych do wnętrza osłonek. Innym miejscem nieszczelności kanałów dużej części cięgien podwieszających jest połączenie kołnierza z rurą prowadzącą, które według założeń projektowych miało być szczelne. Obserwacje poczynione w ramach oględzin dowiodły również, że część otworów w dolnych zakotwieniach pozostawionych jako niewykorzystane do podwieszenia obiektu została zaślepiona odcinkiem splotu, który wraz ze szczęką kotwiącą pozwala się łatwo przemieszczać w zakotwieniu. Takie rozwiązanie, zastosowane prawdopodobnie z uwagi na konieczność uszczelnienia strefy zakotwienia w czasie wprowadzania kompozycji trwale plastycznej, pozwala jednak na powolną korozję niezabezpieczonej końcówki splotu w kanale cięgna podwieszającego.



a) b)

Fig. 10. View of the lower part of the steel pylon structure including the initial section of the PEHD sheath (a), results of the coating chalking test on the surface of the steel plate enclosing the top anchorage boxes in the P-D5 pylon (b); numerical evaluation of coating chalking from the outside: 2, on the inside: no chalking
Rys. 10. Widok dolnej części stalowej konstrukcji pylonu wraz z początkowym odcinkiem osłonki PEHD (a), wyniki badania skredowania powłoki na powierzchni stalowej płyty zamykającej skrzynie zakotwień górnych w pylonie P-D5 (b); liczbowa ocena skredowania powłoki od zewnątrz: 2, od wewnątrz: brak skredowania

In summary, the assessment of the current state of the structures suspension resulted in mostly positive observations, but a few observations of a negative nature were also made. The first is the presence of cracks in the outer PEHD sheaths of two of the 20 suspension cables. The resulting leaks allow air, moisture, dirt and biological agents to enter the sheaths. Another place of leakage in the channels of a large part of the suspension cables is the connection of the flange to the guide pipe, which was supposed to be tight by design. Observations made as part of the visual inspection also proved that some of the holes in the lower anchorages left unused for the structures suspension had been plugged with a section of the strand, which, along with the anchorage clamp, allows for easy movement in the anchorage. Such a solution, probably applied because of the need to seal the anchorage zone during the introduction of the permanent plastic composition, however, allows slow corrosion of the unprotected strand end in the suspension cable channel.

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Internal prestressing cables and suspension cables made of parallel strands are well protected against corrosive phenomena thanks to a set of system solutions. However, the length of service life of suspended and prestressed structures, as well as errors made during their construction and the damage caused during service, have an undeniable impact on their condition. In addition, however, local damage to the outer sheath allows water and various contaminants to enter it and should absolutely be repaired to prevent the accumulation of water and contaminants in the vicinity of the lower cable anchorage. The importance of prestressing steel in the structure means that the progress of corrosion processes in its area can lead to a decrease in its real load-bearing capacity, and thus affect the decrease in the safety reserve.

Despite the use of highly specialized structural and material solutions, the progression of corrosion processes in the elements of the surveyed structure is noticeable, and wherever there is local damage or deviation from workmanship standards, the impact of damage is significant. The survey of the bridge structure undertaken gives rise to the following conclusions:The bonded prestressing cables are sufficiently protected from corrosion, provided that the grouting is properly performed and that they are effectively protected from contact with the surrounding

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Cięgna sprężające wewnętrzne oraz cięgna podwieszające ze splotów równoległych dzięki zastosowaniu kompletu rozwiązań systemowych są dobrze chronione przed zjawiskami korozyjnymi. Jednak długość okresu eksploatacji konstrukcji podwieszonych i sprężonych, a także błędy popełnione w czasie ich budowy i uszkodzenia wynikłe w czasie eksploatacji mają niezaprzeczalny wpływ na ich stan. Dodatkowo jednak lokalne uszkodzenia osłony zewnętrznej pozwalają na dostęp wody i różnych zanieczyszczeń do jej wnętrza i bezwzględnie powinny być usuwane, aby zapobiec ich gromadzeniu w sąsiedztwie zakotwienia dolnego cięgna. Znaczenie stali sprężającej w konstrukcji sprawia, że postęp procesów korozyjnych w jej obszarze może prowadzić do spadku jej realnej nośności, a przez to wpływać na obniżanie się zapasu bezpieczeństwa.

Mimo stosowania wysoko specjalistycznych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych postęp procesów korozyjnych w elementach badanego obiektu jest zauważalny, a wszędzie tam, gdzie dochodzi do lokalnych uszkodzeń lub odstępstw od standardów wykonania, wpływ uszkodzeń jest istotny. Podjęte badania obiektu mostowego dają podstawę do sformułowania następujących wniosków:

1. Kable sprężające z przyczepnością są wystarczająco chronione przed korozją pod warunkiem poprawnie wykonanej iniekcji oraz skutecznej ochrony przed kontaktem z otaczającym powietrzem poprzez warstwę betonu ochronnego o wystarczającej miąższości i odpowiednim odczynie *pH*. Zakotwienia kabli sprężających wewnętrznych w dźwigarach badanego obiektu chronione są warstwą betonu, która utraciła swoje zdolności ochronne i wymaga wymiany.
2. Zaobserwowana korozja kabli sprężających w poprzecznicach stanowi duże zagrożenie i wymaga wprowadzenia programu naprawczego.
3. Stal cięgien podwieszających, których osłony są uszkodzone, w strefie sąsiadującej z zakotwieniem jest narażona na ryzyko potencjalnego rozwoju procesów korozyjnych, ponieważ fabrycznie naniesione powłoki ochronne na materiałach są w tej strefie przerwane, a ponadto dochodzi tam do kontaktu różnych materiałów. Dodatkowo, obecność nieosłoniętych fragmentów cięgien, jak na przykład odcinki splotów wetkniętych w zakotwienie w celu wypełnienia niewykorzystanych

air by a layer of protective concrete of sufficient thickness and appropriate *pH*. The anchorages of the internal prestressing cables in the girders of the surveyed structure are protected by a layer of concrete that has lost its protective capacity and needs to be replaced.

1. The observed corrosion of the prestressing cables in the cross-beams poses a major threat and requires the implementation of a repair program.
2. The steel of the suspension cables, whose sheaths are damaged, in the zone adjacent to the anchorage is exposed to the risk of potential development of corrosion processes, since the factory-applied protective coatings on the materials are broken in this zone, and there is also contact between different materials. In addition, the presence of bare cable fragments, such as sections of strands plugged into the anchorage to fill unused clamp holes, creates conditions for rust to appear and develop.
3. Corrosion processes in the anchorage zone can dynamically reduce the safety margin of the structure. Reports in papers [5, 6] confirm that in some cases suspension cables are replaced after a service life of less than 20 years.

For a clear presentation of the risks posed by the current degree of corrosion phenomena to cables in the surveyed structure, Table 3 was drawn up, in which the severity of each risk is shown in color. In addition, it includes information on the potential consequences that could occur in the event of further, unprevented development of existing structural damage due to corrosion. The information resulting from the summary presented in the table can be used in the work of engineers in assessing the durability of suspension bridges to select the areas to be visually inspected and surveyed.

Based on the above findings, it should be concluded that in order to achieve the safety of infrastructure facilities – even with a small number of elements exposed to factors that generate corrosion processes – it is still necessary to regularly conduct extensive surveys of the condition of the facilities, going significantly beyond the scope of surface observations of the structure.

otworów na szczęki, stwarza warunki dla pojawienia się i rozwoju rdzy.

4. Procesy korozyjne w strefie zakotwień mogą w sposób dynamiczny obniżyć margines bezpieczeństwa konstrukcji. Doniesienia zawarte w pracach [5, 6] potwierdzają, że w niektórych przypadkach dochodzi do wymiany cięgien podwieszających po okresie eksploatacji krótszym niż 20 lat.

Dla przejrzystego przedstawienia zagrożeń, jakie wynikają z obecnego stopnia zaawansowania zjawisk korozyjnych dla cięgien w badanym obiekcie sporządzono Tabl. 3, w której waga poszczególnych zagrożeń jest przedstawiona kolorami. Dodatkowo, zawarto w niej obraz potencjalnych skutków, jakie mogą zaistnieć w wypadku dalszego, niepowstrzymanego rozwoju istniejących uszkodzeń konstrukcji na skutek korozji. Informacje wynikające z przedstawionego w tablicy zestawienia mogą być wykorzystywane w pracy inżynierów przy ocenie trwałości mostów podwieszonych w celu typowania obszarów poddawanych oględzinom i badaniom.

W oparciu o powyższe konkluzje stwierdzić należy, że w celu uzyskania bezpieczeństwa obiektów infrastruktury nawet z niewielką liczbą elementów wystawionych na działania generujące procesy korozyjne, konieczne jest jednak regularne prowadzenie szerokich badań stanu obiektów, wykraczających znacząco poza zakres powierzchniowych obserwacji konstrukcji.

Table 3. Description of the degree of corrosion with respect to the sheaths and cable anchorages, the internal anchorages of the prestressing cables, and the concrete of the supports with its protective coatings
Tablica 3. Opis stanu zaawansowania korozji w odniesieniu do osłon i zakotwień want, zakotwień wewnętrznych kabli sprężających oraz betonu wsporników wraz z jego powłokami ochronnymi

Element		Degree of corrosion Stopień zaawansowania korozji			Potential impact of current corrosion severity on lowering the load carrying capacity of the structure Potencjalny wpływ obecnego stopnia zaawansowania korozji na obniżenie nośności obiektu			Potential, anticipated, impact of lack of corrective action on safety and durability of the structure (authors opinion) Potencjalny, przewidywany, wpływ braku działań naprawczych na bezpieczeństwo i trwałość obiektu (opinia autorów)		
		low niski	intermediate średni	high wysoki	negligible znikomy	significant znaczący	critical krytyczny	negligible znikomy	significant znaczący	critical krytyczny
Notes on the overall structure Uwagi dotyczące całości obiektu	Coatings on prestressed cross-beam supports Powłoki na sprężonych wspornikach poprzecznic			x		x				x
	Concrete of prestressed cross-beam supports Beton sprężonych wsporników poprzecznic	x			x				x	
	Cable anchorages Zakotwienia want	x			x			x		
	PEHD cable sheaths Osłonki PEHD want	x			x				x	
	Anchorages of cables prestressing cross-beams Zakotwienia kabli sprężających poprzecznice		x			x				x

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

[1] *Zybura A.*, *Śliwka A.*: Zagadnienia trwałości w projektowani konstrukcji żelbetowych. Przegląd Budowlany, 10, 2018, 15-21

[2] *Li H.*, *Ou J.*: The state of the art in structural health monitoring of cable-stayed bridges. Journal of Civil Structural Health Monitoring, **6**, 1, 2016, 43-67, DOI: 10.1007/s13349-015-0115-x

[3] *Xu X.*, *Huang Q.*, *Ren Y.*, *Sun H.B.*: Condition assessment of suspension bridges using local variable weight and normal cloud model. KSCE Journal of Civil Engineering, **22**, 10, 2018, 4064-4072, DOI: 10.1007/s12205-018-1819-3

[4] *Sun S.*, *Liang L.*, *Li M.*: Condition assessment of stay cables via cloud evidence fusion. KSCE Journal of Civil Engineering, **23**, 3, 2021, 866-878, DOI: 10.1007/s12205-021-0139-1

[5] *Rakoczy A.M.*, *Jivan-Coteti A.*: Estimation of the current structural reliability level of existing railway bridges and viaducts. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, **20**, 3, 2021, 289-309. DOI: 10.7409/rabdim.021.017

[6] *Burek E.*, *Gwoździewicz P.*: Szacowanie trwałości konstrukcji żelbetowej zagrożonej korozją. Konferencja TECH BUD, Kraków 2019, 21-33

[7] *Tomelli D.*, *Rossi F.*, *Brighenti F.*, *Verzobio A.*, *Bonelli A.*, *Zonta D.*: Prestressed concrete bridge tested to failure: the Alveo Vecchio viaduct case study. Journal of Civil Structural Health Monitoring, **13**, 1, 2022, 873-899, DOI: 10.1007/s13349-022-00633-w

[8] *Arshad M.A.*, *Fahad M.*, *Khan A.N.*, *Adil M.*, *Khan A.*: Fatigue load effects on highway bridges of Pakistan using Weigh-In-Motion data. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, **21**, 3, 2022, 19-37, DOI: 10.7409/rabdim.022.002

[9] *Madaj A.*, *Mossor K.*, *Siekierski W.*: Awaria kabla sprężającego estakady drogowej. Przyczyny i skutki. Politechnika Poznańska, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, 26, 2018, 109-121, DOI: 10.21008/j.1897-4007.2018.26.09

[10] *Strasky J.*: Precast stress ribbon pedestrian bridges in Czechoslovakia. PCI Journal, **32**, 3, 1987, 52-73, DOI: 10.15554/pcij.05011987.52.73

[11] *Rymsza J.*: Causes of the Morandi viaduct disaster in Genoa as a contribution to the design of pre-stressed structures. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, **19**, 1, 2020, 5-25, DOI: 10.7409/rabdim.020.001

[12] *Li H.*: Replacement of cable stays in Yonghe Bridge in Tianjin, China. Advances in Civil Engineering, 1, 2020, Article ID: 6650393, DOI: 10.1155/2020/6650393

[13] *Suzumura K.*, *Nakamura S.*: Environmental factors affecting corrosion of galvanized steel wires. Journal of Materials in Civil Engineering, **16**, 1, 2004, 1-7, DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:1(1)

[14] *Wieczorek G.*: Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki lub karbonatyzację otuliny. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2002

[15] *Xu F.*, *Wang X.*, *Wang L.*: Cable inspection robot for cable-stayed bridges: design, analysis and application. Journal of Field Robotics, **28**, 3, 2011, 411-459, DOI: 10.1002/rob.20390

Stan zaawansowania korozji mostowych cięgien podwieszających i kabli sprężających po 14 latach eksploatacji

Streszczenie: Cięgna podwieszające pomosty obiektów infrastruktury transportowej oraz kable sprężające powinny być wystarczająco chronione przed wpływami korozji przez cały okres eksploatacji. Niedostateczna ochrona cięgien wynikająca z błędów projektowych, wykonawczych, złego doboru materiałów lub uszkodzeń i niewystarczającego zakresu prac utrzymaniowych stwarza warunki dla rozwoju procesów korozyjnych i prowadzi niejednokrotnie do konieczności przeprowadzenia napraw w celu wydłużenia okresu użytkowania obiektu i spowolnienia procesu degradacji konstrukcji. W pracy przedstawiono wyniki obserwacji i badań elementów podwieszenia oraz kabli sprężających w istniejącym obiekcie mostowym, które ilustrują rzeczywisty zakres postępujących zmian ich stanu technicznego po 14 latach eksploatacji. Dodatkowo pokazano, że procesy korozyjne występują także w obiekcie mostowym ukształtowanym zgodnie z obowiązującymi przepisami.

Słowa kluczowe: beton sprężony, cięgna podwieszające, eksploatacja, kable sprężające, trwałość.