



LIDIA WIĘCŁAW-BATOR<sup>1)</sup>  
 WOJCIECH MOĆKO<sup>2)</sup>  
 RYSZARD CHMIELEWSKI<sup>3)</sup>  
 LEOPOLD KRUSZKA<sup>4)</sup>

## MINIMIZING THE OCCURRENCE OF FACTORS AFFECTING THE ACCELERATION OF DEGRADATION PROCESS OF STEEL BRIDGE STRUCTURES

## MINIMALIZOWANIE WYSTĘPOWANIA CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA PRZYSPIESZENIE PROCESU DEGRADACJI STALOWYCH OBIEKTÓW MOSTOWYCH

**STRESZCZENIE.** W artykule omówiono typowe uszkodzenia stalowych obiektów mostowych, w szczególności obiektów zlokalizowanych na terenach silnie zurbanizowanych. Obiekty te są szczególnie narażone na występowanie wielu czynników przyspieszających proces ich degradacji, takich jak: zanieczyszczenie powietrza, prądy błędzące oraz duża ilość cykli obciążeń. Zasadniczym celem autorów było sformułowanie ogólnych zaleceń, których wdrożenie w sposób bezpośredni lub pośredni może przyczynić się do spowolnienia procesu degradacji stalowych obiektów mostowych. Dodatkowo zalecenia te mogą wpływać na zwiększenie bezpieczeństwa i komfortu użytkowników dróg oraz wydłużyć czas bezpiecznej eksploatacji tych obiektów. Zalecenia obejmujące fazę projektowania, budowy i eksploatacji obiektów mostowych sformułowano na podstawie wieloletnich doświadczeń nabytych podczas przeglądów drogowych i kolejowych obiektów mostowych o konstrukcji stalowej.

**SŁOWA KLUCZOWE:** mechanizmy degradacji, stalowe obiekty mostowe, uszkodzenia.

**ABSTRACT.** The paper describes typical damage of steel bridge structures and in particular structures located in highly urbanized areas. These objects are especially prone to a number of factors that accelerate their process of degradation, such as air pollution, stray currents or a large number of load cycles. The main aim of the authors was to formulate general recommendations, the implementation of which may contribute, directly or indirectly, to slowing the degradation process of steel bridge structures. In addition, these recommendations may increase the safety and comfort of road users and extend the safe operation of these structures. Recommendations that cover the phases of the design, construction and operation of bridge structures were formulated on the basis of many years of experience, which was acquired during inspections of steel road and rail bridge structures.

**KEYWORDS:** damage, mechanisms of degradation, steel bridge structures.

DOI: 10.7409/rabdim.016.020

<sup>1)</sup> Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa; lidia.wieclaw-bator@wp.pl (✉)

<sup>2)</sup> Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa; wojciech.mocko@its.waw.pl

<sup>3)</sup> Katedra Budownictwa Komunikacyjnego i Inżynierii Wojskowej, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; ryszard.chmielewski@wat.edu.pl

<sup>4)</sup> Katedra Budownictwa Komunikacyjnego i Inżynierii Wojskowej, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; leopold.kruszka@wat.edu.pl

## 1. WPROWADZENIE

Stan eksploatacyjny infrastruktury transportowej odgrywa zasadniczą rolę w rozwoju społeczno-gospodarczym. Rozwój infrastruktury transportowej wpływa korzystnie na obniżenie kosztów transportu, wzrost produktywności przedsiębiorstw, zwiększenie zatrudnienia, poprawę bezpieczeństwa, zmniejszenie uciążliwości ekologicznej, podniesienie mobilności społeczeństwa, poprawę komfortu podróżowania, skrócenie czasu podróży oraz poprawę poziomu i jakości życia [1]. Obiekty mostowe stanowią zaś newralgiczne punkty sieci dróg, niejednokrotnie decydujące o ich przydatności użytkowej, dlatego powinny być tak zaprojektowane i wykonane, aby w przyjętym okresie użytkowania i poziomie utrzymania zapewniona była ich trwałość rozumiana jako zdolność użytkowania obiektu przy zachowaniu cech wytrzymałościowych i eksploatacyjnych, których miernikiem są stany graniczne nośności oraz użytkowania [2].

W Polsce na sieci dróg publicznych o łącznej długości 412,3 tys. km znajduje się ponad 35 tys. obiektów mostowych i tuneli, z czego około 13,61% stanowią obiekty mające stalowe przęsła [3]. PKP Polskie Linie Kolejowe SA jest zarządcą około 8 tys. obiektów, z czego 42% stanowią obiekty stalowe [4]. Kwestie projektowania, budowy, utrzymania oraz użytkowania tych obiektów regulują: ustawy [5-8], rozporządzenia wykonawcze [2], [9-11], zarządzenia [12-15] oraz normy [16-18] wykorzystane np. do oceny nośności w [19]. Problematyka cyklu życia obiektów mostowych cieszy się interdyscyplinarnym zainteresowaniem krajowych i zagranicznych specjalistów z zakresu budownictwa, mechaniki, materiałoznawstwa, informatyki i zarządzania, którzy dążą między innymi do:

- udoskonalenia lub opracowania nowych, nieniszczących metod diagnostycznych umożliwiających niezawodną identyfikację uszkodzeń stalowych elementów [20],
- opracowania metodyki prognozowania postępu procesu degradacji obiektów mostowych w czasie [21-24] oraz wpływu uszkodzeń [25], zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych [26-31] na ich trwałość,
- wprowadzania nowych rozwiązań konstrukcyjnych w mostownictwie [32],
- wprowadzenia do obrotu trwałych, innowacyjnych wyrobów budowlanych [33],
- udoskonalenia programów komputerowych wspomagających zarządzanie eksploatacją obiektów mostowych, w tym podejmowanie optymalnych decyzji dotyczących alokacji ograniczonych środków finansowych na prace utrzymaniowe [34-35],

## 1. INTRODUCTION

The maintenance state of transport infrastructure plays a crucial role in socio-economic development. The development of transport infrastructure contributes to a reduction of transport costs, an increase of business productivity and employment, an improvement of safety, a reduction of environmental burden, an increase in the mobility of society, an improvement of passenger comfort, a reduction of travel time and also an improvement of the level and quality of life [1]. Bridge structures are the vulnerable points of road networks, but at the same time often determine whether they can be used. They should therefore be designed and constructed so that during a specified period of operation and specified level of maintenance their durability, which is understood as the ability of a building object to be used while preserving its strength and maintenance characteristics that are measured by ultimate and serviceability limit states [2], is provided.

In Poland there are more than 35 000 bridge structures and tunnels along the public road network with a total length of 412 300 km, of which about 13.61% are objects with steel spans [3]. PKP Polish Railway Lines SA is the operator of about 8 000 objects, of which 42% are steel ones [4]. Issues related to the design, construction, maintenance and operation of these facilities are governed by Acts [5-8], which implement regulations [2] and [9-11], ordinances [12-15], and standards [16-18] used e.g. to calculate the load-carrying capacity in [19]. The problem of the life cycle of bridge structures is of an interdisciplinary interest of domestic and foreign specialists from the field of civil engineering, mechanics, material science, IT and management, who aim, among other things:

- to improve or develop new non-destructive diagnostic methods that enable reliable identification of steel element damage [20],
- to develop a methodology of predicting the progress of the degradation process of bridge structures over time [21-24] as well as the impact of damage [25], fatigue and corrosion phenomena [26-31] on their durability,
- to introduce new structural solutions in bridge engineering [32],
- to implement sustainable and innovative construction products [33],
- to improve computer programs that support the management of bridge structure exploitation, including making optimal decisions concerning the allocation of scarce financial resources for maintenance work [34-35],

- udoskonalenia przepisów i procedur projektowania, budowy i eksploatacji drogowych oraz kolejowych obiektów mostowych [36-38].

- to improve the rules as well as procedures of designing, constructing and operating road and rail bridge structures [36-38].

## 2. METODYKA BADAŃ

Zasadniczym celem autorów artykułu było sformułowanie ogólnych zaleceń, których wdrożenie w sposób bezpośredni lub pośredni może przyczynić się do spowolnienia procesu degradacji stalowych obiektów mostowych, zwiększenia bezpieczeństwa i komfortu użytkowników dróg oraz zminimalizowania występowania niepowetowanych szkód w mieniu. Zalecenia te sformułowano na podstawie wieloletnich obserwacji przeprowadzanych podczas przeglądów, wizji lokalnych oraz szczegółowych oględzin kilkudziesięciu stalowych drogowych i kolejowych obiektów mostowych, w szczególności:

- kładki dla pieszych nad ulicą Jagiellońską przy ulicy Kotsisa w Warszawie, która została zakwalifikowana przez zarządcę do rozbiórki,
- mostu drogowego w ciągu ulicy Białołęckiej nad Kanałem Żerańskim w Warszawie, który został zakwalifikowany przez zarządcę do remontu,
- stalowej estakady w ciągu drogi krajowej nr 8, wjazd na Trasę Toruńską w kierunku centrum z północy i południa [39],
- mostu kolejowego nad rzeką Pichną, zlokalizowanego na linii Chorzów Batory-Tczew [39],
- mostu kolejowego nad Kanałem Żerańskim w Nieporęcie [39].

Na potrzeby przeprowadzenia przeglądów okresowych kontrolnych opracowane zostały szczegółowe wytyczne, zarówno dla oceny obiektów drogowych [13-14], jak i obiektów kolejowych [15]. W szczególnych przypadkach, przykładowo gdy należy określić dopuszczalne parametry obciążeń lub w razie konieczności zakwalifikowania obiektu do przebudowy, zakres obowiązkowych kontroli okresowych (rocznych i pięcioletnich) okazuje się zazwyczaj niewystarczający. W związku z powyższym przewidziano kontrole, których zasadniczym zadaniem jest dokładne określenie parametrów materiałowych i geometrycznych wybranych elementów konstrukcji bądź całych obiektów mostowych. W przypadku obiektów kolejowych są to przeglądy specjalne, natomiast w kontekście obiektów drogowych są to ekspertyzy. Zakres przeglądów specjalnych stalowych mostów kolejowych czy też ekspertyz stalowych mostów drogowych powinien być za każdym razem określany w sposób indywidualny dla danego obiektu.

## 2. RESEARCH METHODOLOGY

The main objective of the authors of the paper was to formulate general recommendations, the implementation of which may directly or indirectly contribute to slowing the degradation process of steel bridge structures, increase the safety and comfort of road users and minimize the occurrence of irreparable damage to property. These recommendations were formulated on the basis of many years of observations carried out during inspections, site visits and detailed examinations of dozens of steel rail and road bridge structures, e.g.:

- a footbridge over Jagiellońska street, which is located on Kotsis street in Warsaw and that has been qualified to be demolished,
- a road bridge on Białołęcka street over the Żerański canal in Warsaw that has been classified to be restored,
- a steel flyover on national road No. 8 at the entrance to the Toruń route towards the town centre from the north and south [39],
- a rail bridge over the Pichna river located on the Chorzów Batory-Tczew railway line [39],
- a rail bridge over the Żerański canal in Nieporęt [39].

For the purpose of carrying out periodic control inspections, detailed guidelines for the evaluation of road [13-14] and rail [15] structures have been developed. In special cases, e.g. when the acceptable parameters of loads need to be specified or if it is necessary to qualify a building object for reconstruction, the range of mandatory periodic (annual and five-year) control inspections usually turns out to be insufficient. Therefore, supervision is planned in which the principal task is to accurately determine the material parameters and geometry of selected structural elements or entire bridge structures. In the case of rail structures they are specific inspections and in the case of road structures – expert reports. The scope of special inspections of steel rail bridge structures or expert reports of steel road bridge structures should be individually determined for each object.

The basic research that needs to be carried out should include the determination of the degree of structure degradation (among others, by the measurement of corrosion diminution), the geometry of the structure and the real parameters of the built-in materials. Measurements of local

Podstawowe badania jakie należy wykonać powinny obejmować określenie stopnia degradacji konstrukcji (m.in. poprzez pomiary ubytków korozyjnych), geometrii konstrukcji oraz rzeczywistych parametrów wbudowanych materiałów. Szczególnie pomiary deformacji lokalnych w strefach podporowych, pomiary wybożenia środków blachownic oraz deformacja łączonych elementów w węzłach dźwigarów kratownicowych mogą dostarczyć dużo informacji o wyeksploatowaniu obiektu, a tym samym o jego przydatności użytkowej. Zalecane przez zespół autorski pomiary i badania dla określenia powyższych cech powinny obejmować:

- pomiary zakresu i głębokości uszkodzeń korozyjnych,
- określenie stopnia osłabienia przekrojów, w tym ich rzeczywistych parametrów geometrycznych,
- wykrywanie, ocenę wielkości oraz przyczyn powstania pęknięć elementów konstrukcji,
- pomiary geometrii konstrukcji, w tym niwelację przęseł,
- badania pobranych próbek na prasach wytrzymałościowych,
- badania udarności stali,
- badanie składu chemicznego stali.

Dobór miejsc do badań i pomiarów oraz pobierania próbek powinien być zawsze ustalany indywidualnie dla poszczególnych konstrukcji. Przy pobieraniu próbek do niszczących badań wytrzymałościowych miejsca te należy lokalizować tak, aby nie doprowadzić do nadmiernego osłabienia konstrukcji, tj. miejsca pobrania próbki powinno być natychmiast uzupełnione/wzmocnione. Należy również wybrać miejsca reprezentatywne dla obiektu, czyli takie, w których można spodziewać się największego osłabienia elementów w wyniku zmęczenia materiału. Zaleca się, aby miejsca te zostały ustalone na podstawie szczegółowych analiz obliczeniowych, uwzględniających częstotliwość i intensywność występowania wszystkich możliwych obciążeń stałych i zmiennych.

### **3. USZKODZENIA I CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA PRZYSPIESZENIE PROCESU DEGRADACJI STALOWYCH ELEMENTÓW OBIEKTÓW MOSTOWYCH**

Wieloletnia obserwacja rzeczywistych obiektów mostowych, zarówno drogowych, jak i kolejowych wykazała, że najpopularniejszymi uszkodzeniami stalowych elementów konstrukcyjnych i wyposażenia obiektów mostowych są [4]:

deformations in support zones, measurements of the buckling of plate girder webs and the deformation of connected elements in the nodes of truss girders can provide a lot of information about the state of exploitation of an object, and thus about its usability. The measurements and tests that are recommended by the authors to determine the above characteristics should include:

- measurements of the extent and depth of corrosion damage.
- determination of the degree of cross-section weakening, including their real geometric parameters,
- detection and assessment of the size and causes of the occurrence of cracks in structural elements,
- measurements of a structure's geometry, including the levelling of spans,
- tests of specimens on strength presses,
- tests of the impact resistance of steel,
- tests of the chemical composition of steel.

The selection of places for tests, measurements and sampling should always be individually determined for each construction. Specimens for destructive strength testing should be taken from places that will not lead to excessive weakening of a structure, i.e. the place of taking specimens should be immediately filled in/strengthened. A representative area for a building object, i.e. the place where the greatest weakening of elements as a result of material fatigue can be expected, should also be chosen. It is recommended to determine such places on the basis of detailed computational analysis that includes the frequency and intensity of the occurrence of all possible fixed and variable loads.

### **3. DAMAGE AND FACTORS AFFECTING THE ACCELERATION OF DEGRADATION PROCESS OF STEEL ELEMENTS OF BRIDGE STRUCTURES**

Long-term observation of existing bridge structures, both road and rail ones, showed that the most common damage to the steel structural elements and equipment of bridge structures constitutes [4]:

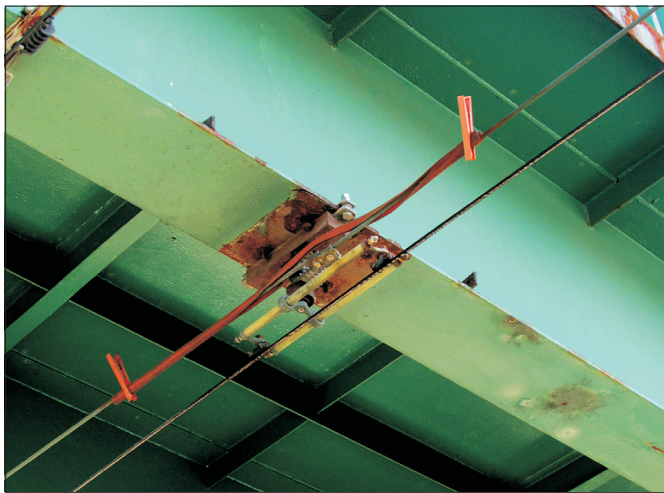
- a) the destruction of a material that involves unfavourable changes to its chemical and/or physical properties, e.g. uniform corrosion (surface), pitting corrosion (deep), crevice corrosion, stress corrosion, galvanic corrosion (bimetallic) and microbial corrosion (e.g. Figs. 1a-d),



a)



b)



c)



d)

Fig. 1. Material destruction: a) corrosion of the bottom plate girder of a road bridge, b) corrosion of the main girder of a road bridge, c) corrosion of the lower flange of the girder due to a lack of protection against stray currents, d) corrosion of the stair structure of a footbridge (own photos)

Rys. 1. Destrukcja materiału: a) korozja pasa dolnego blachownicy mostu drogowego d) korozja dźwigara głównego mostu drogowego, c) korozja półki dolnej dźwigara na skutek braku zabezpieczenia przed prądami błądzącymi, d) konstrukcji schodów kładki dla pieszych (fotografie własne)

a) destrukcje materiału polegające na niekorzystnych zmianach jego właściwości chemicznych i/lub fizycznych, np. korozji równomiernej (powierzchniowej), korozji wżerowej (wglębnej), korozji szczelinowej, korozji naprężeniowej, korozji galwanicznej (bimetalicznej), korozji mikrobiologicznej (np. Rys. 1a-d),

b) ubytki materiału polegające na zmniejszeniu pola powierzchni przekroju elementu oraz częściowa lub całkowita dysfunkcja powłok antykorozyjnych (Rys. 2a-c),

b) loss of material involving the reduction of a cross-sectional area of an element and partial or complete dysfunction of anti-corrosive coatings (Figs. 2a-c),

c) loss of the continuity of an element's cross-section:

- scratches that involve the loss of continuity of a part of element's cross-section,
- cracks resulting from the loss of continuity of the entire cross-section of an element, which are the consequence of sudden brittle destruction, brittle fatigue destruction or material fatigue failure (Figs. 3a-c),

## c) utrata ciągłości przekroju elementu:

- rysy na skutek utraty ciągłości części przekroju elementu,
- pęknięcia wynikające z utraty ciągłości całego przekroju elementu, będące następstwem nagłego kruchej zniszczenia, kruchej zniszczenia zmęczeniowego lub zmęczenia materiału (Rys. 3a-c),

## d) deformacje – niezgodne z projektem zmiany (trwałe lub nietrwałe) geometrii konstrukcji powodujące zmiany wzajemnych odległości jej punktów, zachodzące bez modyfikacji położenia całej konstrukcji lub jej części (Rys. 4a-b),

## e) zanieczyszczenia polegające na akumulacji składników organicznych i nieorganicznych na powierzchni elementów (Rys. 5a-b),

## f) zmiany położenia elementów związane z ich niewłaściwym usytuowaniem, nadmiernym przemieszczeniem liniowym, nadmiernym obrotem, ograniczeniem możliwości przemieszczenia liniowego oraz ograniczeniem możliwości obrotu.

## d) deformations – changes (permanent or temporary) of a structure's geometry that are inconsistent with the project and cause mutual changes in the distances between its points that occur without changing the position of a part or whole of the structure (Figs. 4a-b),

## e) dirt that means an accumulation of organic and inorganic substances on the surface of elements (Figs. 5a-b),

## f) changes in the position of elements that involve their improper location, excessive linear displacement, excessive rotation, reduction of the possibility of linear displacement and reduction of the possibility of rotation.



a)



b)



c)

Fig. 2. Material losses: a) corrosion of the vertical metal sheets of the bottom chord of a rail bridge, b) perforation of guardrails, c) peeling of the anti-corrosive coating of a bearing (own photos)  
 Rys. 2. Ubytki materiału: a) przebicie korozyjne pionowych blach pasa dolnego mostu kolejowego, b) perforacja barierek ochronnych, c) złuszczenie powłoki antykorozyjnej łożyska (fotografie własne)



a)



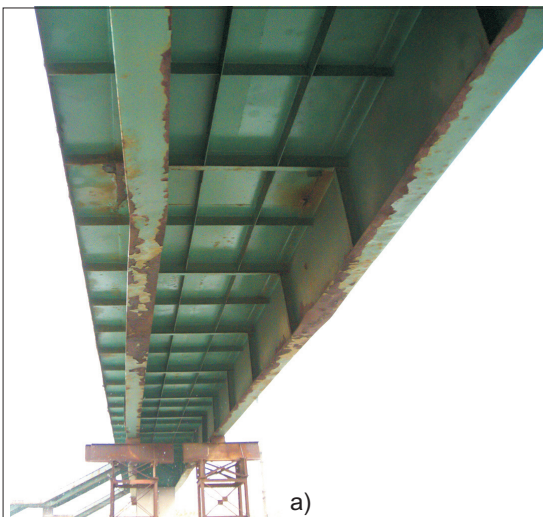
b)



c)

Fig. 3. Loss of continuity: a) a fracture of a gusset plate in the deck of a railway bridge, b) loss of continuity of a corroded riser, c) loss of continuity of the provisional profile of descents for trolleys (own photos)

Rys. 3. Utrata ciągłości: a) pęknięcie blachy węzłowej w pomoście mostu kolejowego, b) utrata ciągłości skorodowanej podstopnicy, c) utrata ciągłości prowizorycznego profilu zjazdów na wózki (fotografie własne)



a)



b)

Fig. 4. Deformations: a) deformation of the bottom girder of a footbridge, b) deformation of the bottom truss girder of a rail bridge (own photos)

Rys. 4. Deformacje: a) deformacja pasa dolnego dźwigara kładki dla pieszych, b) deformacja pasa dolnego dźwigara kratowniczego mostu kolejowego (fotografie własne)



Fig. 5. Dirt: a) graffiti on railings, b) leakage of a substance that protects a cable against corrosion (own photos)

Rys. 5. Zanieczyszczenia: a) graffiti na balustradach ochronnych, b) wycieki masy zabezpieczającej antykorozyjnie cięgna (fotografie własne)

Uszkodzenia korozyjne tworzą się na skutek mechanizmów chemicznych powstałych w wyniku reakcji chemicznych, mechanizmów fizycznych związanych z zachodzącymi zjawiskami fizycznymi i mechanizmów biologicznych związanych z oddziaływaniem czynników biologicznych [2, 4]. Mechanizmy te są stymulowane (chwilowo, krótkotrwale lub długotrwale) działaniami ludzi i/lub oddziaływaniami środowiska (Rys. 6). Identyfikacja tych mechanizmów ma istotne znaczenie podczas dokonywania okresowych, ustawowych kontroli stanu technicznego obiektów mostowych, łącznie z bieżącymi, podstawowymi, rozszerzonymi i szczegółowymi przeglądami [13-15], a także opinii biegłych na okoliczność ustalenia związków przyczynowo-skutkowych powstałych uszkodzeń eksploatacyjnych oraz ujawnienia wad fizycznych, w tym ukrytych na etapie projektowania i wykonawstwa.

Corrosion damage arises due to the following: chemical mechanisms that result from chemical reactions, physical mechanisms associated with ongoing physical phenomena and biological mechanisms related to the effects of biological agents [2, 4]. These mechanisms are stimulated (temporary, short-term or long-term) by human actions and/or environmental influences (Fig. 6). The identification of these mechanisms is important when making periodic statutory inspections of the technical condition of bridge structures and include current, basic, extended and detailed inspections [13-15], as well as expert opinions on the determination of cause-and-effect relations between the occurred exploitation damage and disclosure of physical defects, including the defects that are hidden at the stage of design and construction.

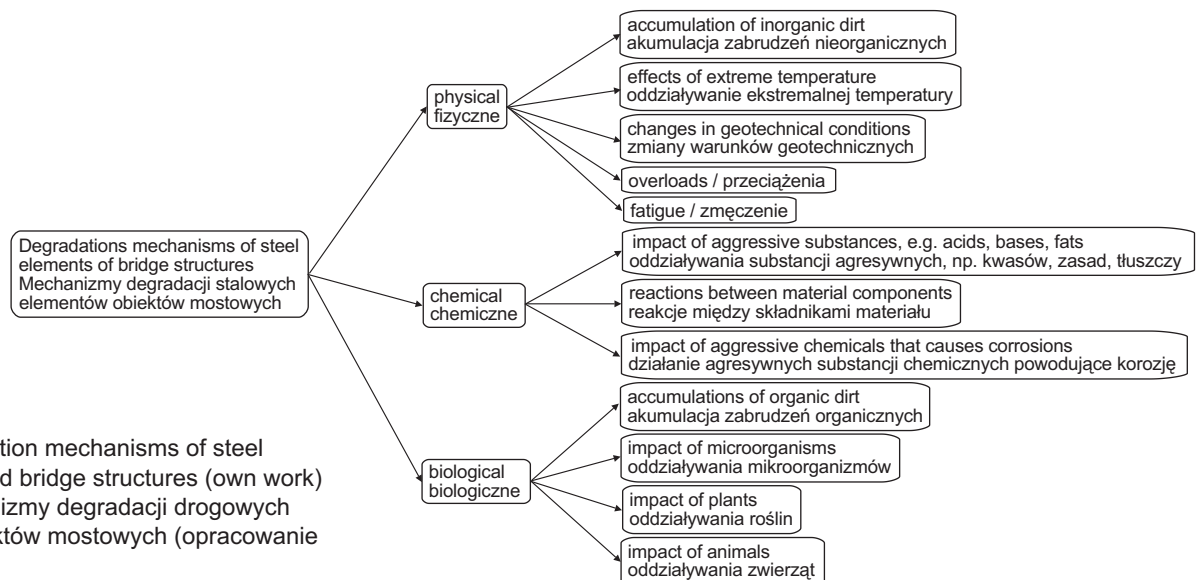


Fig. 6. Degradation mechanisms of steel elements of road bridge structures (own work)  
Rys. 6. Mechanizmy degradacji drogowych stalowych obiektów mostowych (opracowanie własne)



Do błędów ludzkich jako przyczyny powstawania i rozwoju degradacji stalowych obiektów mostowych można zaliczyć:

a) błędy projektowe:

- niewłaściwa lokalizacja obiektu, budowa obiektów o zaniżonej skrajni ruchu,
- przyjmowanie błędnych lub zbyt uproszczonych modeli obliczeniowych, np. uwzględnianie pracy elementów wyposażenia do obliczeń nośności i deformacji konstrukcji lub też brak ich uwzględniania przy obliczaniu częstotliwości drgań własnych,
- stosowanie niewłaściwych wyrobów budowlanych, np. wyrobów ze stali o bardzo różnicowanych potencjałach elektrochemicznych,
- występowanie miejsc (punktów) o nadmiernej lokalnej koncentracji naprężeń, często wynikających zarówno z błędnego (uproszczonego) modelowania konstrukcji,
- występowanie miejsc trudno dostępnych, nieprzewidywanych, uniemożliwiających wykonanie powłok ochronnych i ich renowację oraz narażonych na zbieranie się kurzu, pyłów, wody lub skroplin pary wodnej (Rys. 1b),
- niedostosowanie antykorozyjnych powłok ochronnych do stopnia agresywności środowiska i okresu użytkowania obiektu (projektant powinien każdorazowo określać trwałość powłoki),

b) błędy wykonawcze:

- zła jakość wbudowywanych wyrobów budowlanych będąca wynikiem wadliwej produkcji i/lub niestaranego załadunku, transportowania, rozładunku i/lub składowania wyrobów na placu budowy,
- zła jakość robót budowlanych będąca wynikiem zlecenia robót niewykwalifikowanym robotnikom oraz zaniedbań kierownika budowy i osób sprawujących nadzór inwestorski, np. niewłaściwa aplikacja powłok antykorozyjnych (Rys. 2c),
- niewłaściwa jakość połączeń, mimośrodowe łączenie elementów,
- nieprzemyślane odstępstwa od projektu,

c) niewłaściwe użytkowanie obiektu:

- przekraczanie dopuszczalnego poziomu obciążeń,
- przekraczanie wymiarów skrajni ruchu (Rys. 4a),
- przekraczanie dopuszczalnej prędkości przejazdów,

d) niewłaściwe utrzymanie obiektu:

- nieegzekwowanie od wykonawców usuwania usterek ujawnionych w okresie gwarancyjnym,

The causes of the formation and development of the degradation of steel bridge structures due to human errors are as follows:

a) design errors:

- the incorrect location of a structural object or construction of structures with an undervalued structure gauge,
- the assumption of incorrect or overly simplified computational models, e.g. considering the work of elements of equipment when calculating the load-bearing capacity and deformation of a structure, or the lack of taking them into account when calculating the frequencies of natural vibrations,
- the use of improper construction products, e.g. steel products with very different electrochemical potentials,
- the occurrence of areas (points) with excessive local stress concentrations, which often result from erroneous (simplified) modelling of a construction,
- the occurrence of difficult to reach and not airy places, in which it is impossible to execute protective coatings and carry out their renovation. Such places are prone to an accumulation of dust, water or condensation of water vapor (Fig. 1b),
- the inadequacy of anti-corrosive protective coatings to the degree of the aggressiveness of the environment and the duration of service life of a structure (a designer should always determine the durability of a coating),

b) assembly errors:

- poor quality of the installed construction products, which results from faulty manufacturing and/or careless loading, transporting, unloading and/or storing of products on a building site,
- poor quality of construction works that results from employing unskilled workers and also the negligence of a building site manager as well as people responsible for a project's supervision, e.g. improper application of anti-corrosive coatings (Fig. 2c),
- incorrect quality of joints, eccentric connection of elements,
- reckless deviation from a project,

c) improper use of a structure:

- exceeding the permissible level of loads,
- exceeding the dimensions of a structure gauge (Fig. 4a),
- exceeding the permissible speed of travel,

- oznakowywanie dróg w sposób niewłaściwy,
  - niewykorzystywanie dostępnych możliwości eliminowania przejazdów pojazdów ponadnormatywnych,
  - zaniedbania w zakresie utrzymania: sprawności systemu izolacji i odprowadzania wody, właściwej kondycji zabezpieczeń antykorozyjnych, sprawności łożysk i urządzeń dylatacyjnych, usuwania materiałów łatwopalnych zgromadzonych na obiektach mostowych lub w ich bliskim otoczeniu,
  - zwlekanie z realizacją zaleceń z kontroli okresowych,
- e) działania zbrojne lub ataki terrorystyczne,
- f) eksploatację górnictwem,
- g) wandalizm.

Do oddziaływań środowiska negatywnie wpływających na trwałość stalowych elementów drogowych obiektów mostowych, zalicza się [2]:

- a) oddziaływania atmosferyczne, wodne i gruntowo-wodne:
- korozyjne działanie atmosfery, zwłaszcza wilgotnej i zanieczyszczonej agresywnymi gazami, w szczególności spalinami pojazdów oraz spalinami z zakładów przemysłowych,
  - promieniowanie słoneczne powodujące przedwczesne starzenie się warstw ochronnych,
  - cykliczne zmiany temperatury,
  - opady atmosferyczne zawierające zanieczyszczenia chemiczne,
  - erozyjne działanie wód płynących i kry,
  - agresję biologiczną,
  - działanie wód gruntowych,
- b) oddziaływania materiałowe, np. jonizowanie metali lub ich stopów w obecności elektrolitów,
- c) oddziaływania specjalne:
- prądami błądzącymi, wywołanymi trakcją elektryczną (Rys. 1c),
  - środkami chemicznymi stosowanymi do walki z gołedzią w ramach zimowego utrzymania dróg.

Każdorazowo oceniając uszkodzenia stalowych obiektów mostowych należy określić przyczynę ich powstania oraz skuteczny sposób jej zniwelowania. Wymienione powyżej przyczyny powstawania uszkodzeń mogą służyć jako element oceny mechanizmu przebiegu procesu degradacji stalowych obiektów mostowych zgodnie ze schematem na Rys. 6, a tym samym również do oceny ich dalszej przydatności użytkowej. Kompleksowa ocena stopnia degradacji obiektu, określenie zakresu i sposobu wymaganych napraw

- d) improper maintenance of a structure:
- a lack of enforcing building companies to remove defects that occur during the warranty period,
  - incorrect marking of roads,
  - not using available opportunities to eliminate the passage of oversized vehicles,
  - negligence in the area of maintenance: efficiency of insulation and drainage systems, an appropriate condition of anti-corrosive protection, efficiency of bearings and expansion joint devices as well as the removal of flammable materials collected on bridge structures or in their close proximity,
  - delays in implementing recommendations from periodic inspections,
- e) military operations or terrorist attacks,
- f) mining exploitation,
- g) vandalism.

The environmental impacts that adversely affect the durability of the steel elements of road bridge structures include [2]:

- a) weather, water as well as soil and water influences:
- the corrosive effect of the atmosphere, especially when humid and contaminated with aggressive gases resulting from exhaust fumes of vehicles and industrial plants,
  - solar radiation that causes premature aging of protective layers,
  - cyclic temperature changes,
  - precipitation containing chemical pollution,
  - the erosive effects of flowing water and ice,
  - biological aggression,
  - the effects of groundwater,
- b) material impacts, e.g. ionization of metals or their alloys in the presence of electrolytes,
- c) special actions:
- stray currents caused by electric traction (Fig. 1c),
  - the effects of chemicals used to combat ice on roads within the framework of winter road maintenance.

When assessing the damage of steel bridge structures, the cause of its formation and an effective method to deal with it need to be determined. The above-mentioned causes of damage can be used as an element of evaluating the mechanism of the degradation process of steel bridge structures in accordance with the diagram shown in Fig. 6, and they

(z uwzględnieniem przyczyn powstania wad i uszkodzeń) oraz określenie możliwych do osiągnięcia parametrów eksploatacyjnych (nośność, skrajnia, prędkość na obiekcie) pozwala na podjęcie decyzji co do dalszego użytkowania obiektu.

#### 4. PROGRAM NAPRAWCZY

W celu bezpośredniego lub pośredniego spowolnienia procesu degradacji drogowych, a także kolejowych obiektów mostowych, zwiększenia bezpieczeństwa i komfortu użytkowników dróg publicznych oraz zminimalizowania występowania niepowetowanych szkód w mieniu, należy:

- 1) na etapie projektowania obiektu bądź planowania robót remontowych:
  - przestrzegać przepisów technicznych odnośnie projektowania obiektów mostowych dotyczących stosowania ochrony konstrukcyjnej, ochrony materiałowo-strukturalnej oraz ochrony powierzchniowej,
  - rozważyć możliwość skorzystania ze zintegrowanego systemu monitoringu technicznego obiektów inżynierskich (structural health monitoring SHM), składającego się z elementów pomiarowych, systemów akwizycji danych, centrów gromadzenia danych i interfejsów komunikacyjnych,
  - konsultować przyjęte rozwiązania napraw oraz stosowane technologie z przyszłym zarządcą obiektu mostowego,
  - rzetelnie sprawdzać projekty budowlane, projekty wykonawcze i specyfikacje techniczną wykonania oraz odbioru robót budowlanych przed rozpoczęciem tych robót,
  - zwracać uwagę na skuteczność proponowanych rozwiązań systemów naprawczych pod kątem usunięcia przyczyn powstawania uszkodzeń,
  - właściwie ocenić rozwiązania projektowe nowych obiektów pod kątem ich trwałości w odniesieniu do projektowanego czasu użytkowania obiektu (m.in. łożyska, system odwodnienia i rodzaj izolacji, dylatacje, powłoki ochronne),
- 2) na etapie wykonywania robót budowlanych bądź remontowych:
  - zadbać o jakość wbudowywanych materiałów,
  - zadbać o jakość robót mostowych,
  - kontrolować jakość połączeń elementów,
  - kontrolować sposób i jakość wykonania antykorozyjnych powłok ochronnych,

can thereby also be used to assess a structure's suitability for further use. A comprehensive assessment of the degree of a structure's degradation, determination of the scope and method of required repairs (including the causes of defects and damage), and also the identification of operating parameters that are possible to achieve (load-bearing capacity, gauge, speed on a structure) enable a decision about further usage of a building structure to be made.

#### 4. REPAIR PROGRAMME

In order to directly or indirectly slow down the process of the degradation of road and rail bridge structures, increase the safety and comfort of public road users and minimize the occurrence of irreparable damage to the property, the following should be done:

- 1) at the stage of design or planning of repair works:
  - obedience to technical regulations related to the design of bridge structures regarding the use of construction protection, material and structural protection and also surface protection,
  - consideration of the possibility of using an integrated technical monitoring system of engineering structures (structural health monitoring SHM) that consists of measurement elements, data acquisition systems, data collection centers and communication interfaces,
  - consultation with the future manager of a bridge structure regarding acquired repair solutions and applied technology,
  - honest verification of construction projects, executive projects and the technical specifications of the execution and acceptance of construction works before their commencement,
  - consideration of the effectiveness of the proposed solutions of repair systems with reference to the removal of causes of damage,
  - appropriate assessment of the design solutions of new structures with regards to their durability in relation to the projected service lifetime of a structure (e.g. bearings, drainage systems, type of insulations, expansion joints and protective coatings),
- 2) at the construction or repair works stage:
  - ensuring of the quality of built-in materials,
  - ensuring of the quality of bridge works,
  - inspection of the quality of joints between elements,
  - inspection of the manner and quality of applying anti-corrosive coatings,

## 3) na etapie eksploatacji należy:

- zarządzanie drogowymi obiektami mostowymi powierzyć wykwalifikowanej kadrze,
- egzekwować od wykonawców robót usuwania usterek, ujawnionych w okresie gwarancyjnym,
- zadbać o prawidłowe zastosowanie i funkcjonowanie znaków drogowych, sygnalizacji świetlnej oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego,
- przeciwdziałać niszczeniu obiektów mostowych przez użytkowników dróg, zwłaszcza poprzez ich kontrole z udziałem funkcjonariuszy policji, inspektorów transportu drogowego oraz ochrony kolei,
- zabezpieczać obiekty mostowe przed ewentualnymi aktami wandalizmu,
- regularnie oczyszczać konstrukcje obiektów mostowych, zadbać o sprawność systemu izolacji i odprowadzania wody, właściwą kondycję zabezpieczeń antykorozyjnych, sprawność łożysk i urządzeń dylatacyjnych,
- rzetelnie prowadzić ewidencję obiektów mostowych,
- zadbać, aby kontrole okresowe przeprowadzane były przez osoby uprawnione, w pełnym zakresie i z odpowiednią częstotliwością,
- zadbać, aby ustalenia z kontroli okresowych zostały udokumentowane z należytą starannością,
- bez zbędnej zwłoki realizować zalecenia pokontrolne, zwłaszcza te priorytetowe.

Racjonalne zarządzanie eksploatacją dróg i obiektów mostowych jest jednym z podstawowych warunków utrzymania ich ciągłej sprawności, dlatego właściciele infrastruktury nadzorujący funkcjonowanie zarządów winni zwiększyć nadzór nad działalnością podległych im zarządów.

## 5. WNIOSKI

Drogi publiczne, które zostały przejęte na własność przez jednostki samorządu terytorialnego w 1999 roku są w znacznym stopniu wyeksploatowane i wymagają dużych nakładów na przywrócenie ich pełnej wartości użytkowej. W Polsce eksploatacji podlegają jeszcze obiekty mostowe wybudowane w latach 1860-1900, które nie są przystosowane do natężenia ruchu o dużym oddziaływaniu dynamicznym [3]. Z uwagi na występowanie znacznej dysproporcji pomiędzy potrzebami finansowymi na utrzymanie dróg i obiektów inżynierskich a wielkością środków preliminowanych na dany cel, wskazane jest, aby uczestnicy procesu inwestycyjnego, zarządcy oraz użytkownicy tych obiektów wdrożyli zalecenia sformułowane przez autorów artykułu.

## 3) at the exploitation stage:

- entrustment of the management of road bridge structures to qualified staff,
- forcing of executive contractors to remove defects disclosed during the warranty period,
- ensuring of the correct application and functioning of traffic signs, traffic lights and traffic safety equipment,
- preventing of the destruction of bridge structures by road users, especially through inspections with the participation of police officers as well as road transport and railway security inspectors,
- protection of bridge structures against possible acts of vandalism,
- regular cleaning of bridge structure constructions and also the ensuring of the efficiency of insulation and drainage systems, the appropriate condition of anti-corrosive protection and the efficiency of bearings and expansion joints,
- keeping an appropriate record of bridge structures,
- ensuring that periodic inspections are carried out by authorized people, in full scope and with an appropriate frequency,
- ensuring that the findings from periodic inspections are documented with due diligence,
- immediate implementation of inspection recommendations, especially the priorities.

Rational management of road and bridge structure exploitation is one of the basic conditions for maintaining their continued efficiency. Therefore, the owners of infrastructure that supervise the functioning of management boards should increase supervision over the activities of subordinate management boards.

## 5. CONCLUSIONS

Public roads, which became the property of local governments in 1999, are extensively used and require large expenditures to restore their full usage value. Bridge structures built in the years 1860-1900 in Poland, which are not suitable for traffic with high dynamic impact, are still in operation [3]. Due to the presence of a significant disproportion between the financial needs for the maintenance of roads and engineering structures, and the amount of resources budgeted for a specified purpose, it is advisable that participants of the investment process, e.g. administrators and users of these objects, implement the recommendations made by the authors of the paper.

Szczególnie istotnym elementem podlegającym ewaluacji podczas oceny stalowego obiektu mostowego jest określenie przyczyn oraz stopnia degradacji wbudowanego materiału. Służą do tego zarówno proste pomiary geometrii, jak również specjalistyczne badania wytrzymałościowe oraz wbudowanych materiałów. Celowym wydaje się również dążenie do unifikacji rozwiązań projektowych obiektów mostowych małych i średnich rozpiętości w celu ułatwienia ich utrzymania. Dodatkowo na podstawie dostępnych już baz danych (np. SGM, SMOK) należałoby określić rozwiązania stalowych konstrukcji obiektów mostowych, które są podatne na powstawanie uszkodzeń. Przykładem może być otwarty górą pas dźwigarów kratownicowych (Rys. 2a, Rys. 4b). Ponadto bazując na własnym doświadczeniu zawodowym i eksperckim, dokonano w niniejszym artykule podziału mechanizmów degradacji drogowych stalowych obiektów mostowych na potrzeby obowiązkowych kontroli okresowych, a także w celu opracowywania opinii biegłych na okoliczność ustalenia związków przyczynowo-skutkowych powstałych uszkodzeń eksploatacyjnych oraz ujawnienia wad fizycznych, w tym ukrytych, na etapie projektowania i wykonawstwa.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Adamowicz E.: Istota oceny efektywności transportowych inwestycji infrastrukturalnych. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, **639**, 37, 2011, 197-209
- [2] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie
- [3] Informacja o wynikach kontroli – Zarządzanie obiektami mostowymi i przepustami przez administrację drogową. KIN.410.003.00.2015. Nr ewid. 198/2015/P/15/033/KIN. Departament Infrastruktury Najwyższej Izby Kontroli, Warszawa, 2016
- [4] Bień J.: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2010
- [5] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane
- [6] Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych
- [7] Ustawa z dnia 11 sierpnia 2001 roku o szczególnych zasadach odbudowy, remontów i rozbiórek obiektów budowlanych zniszczonych lub uszkodzonych w wyniku działania żywiołu
- [8] Ustawa z dnia 16 grudnia 2005 roku o finansowaniu infrastruktury transportu lądowego
- [9] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie
- [10] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 16 czerwca 2003 roku w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów
- [11] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 lutego 2005 r. w sprawie sposobu numeracji i ewidencji dróg publicznych, obiektów mostowych, tuneli, przepustów i promów oraz rejestru numerów nadanych drogom, obiektom mostowym i tunelom
- [12] Zarządzenie nr 17 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 1 czerwca 2004 roku w sprawie wprowadzenia do stosowania Instrukcji określania nośności użytkowej drogowych obiektów mostowych
- [13] Zarządzenie nr 14 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 7 lipca 2005 roku w sprawie wprowadzenia instrukcji przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów inżynierskich
- [14] Zarządzenie nr 64 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 13 listopada 2008 roku w sprawie wprowadzenia zasad stosowania skali ocen punktowych stanu technicznego i przydatności drogowych obiektów inżynierskich

A particularly important element to be evaluated during the assessment of a steel bridge structure is the determination of the causes and the extent of degradation of built-in materials. Simple measurements of geometry, as well as specialized strength testing and testing of built-in materials, are used for this purpose. It seems appropriate to aim for a unification of design solutions for small and medium span bridge structures in order to facilitate their maintenance. In addition, on the basis of already available databases (e.g. SGM, SMOK), the solutions of steel constructions of bridge structures that are prone to damage should be determined. An open lattice girder (Figs. 2a, Fig. 4b) can be seen as an example. Moreover, based on own professional and expert experience, the division of the mechanisms of degradation of road steel bridge structures was provided in the paper. They were divided for the purpose of both mandatory periodic supervisions and also in order to elaborate expert opinions on the circumstances of cause and effect relations of occurred exploitation damage, as well as to disclose physical defects, including hidden ones, at the design and construction stage.

- [15] Instrukcja utrzymania kolejowych obiektów inżynierskich na liniach kolejowych do prędkości 200/250 km/h, Id-16, załącznik do zarządzenia nr 48/2014 Zarządu PKP PLK z dnia 1 grudnia 2014 roku
- [16] EN 1993-1-1:2005 - Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [17] EN 1993-1-9:2005 - Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue
- [18] EN 1993-1-2:2006 - Eurocode 3: Design of steel structures - Part 2: Steel Bridges
- [19] *Kossakowski P.*: Zagadnienia nośności stalowych mostów kolejowych poddanych wieloletniej eksploatacji w ujęciu norm Eurokod. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **13**, 2, 2014, 115-130
- [20] *Spencer B., Jo H., Mechitov K., Li J., Sim S., Kim R., Cho S., Linderman L., Moinszadeh P., Giles R., Agha G.*: Recent advances in wireless smart sensors for multi-scale monitoring and control of civil infrastructure. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **6**, 1, 2016, 17-41
- [21] *Bień J.*: Modelowanie obiektów mostowych w procesie ich eksploatacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002
- [22] *Zobel H., Alkhafaji T., Wróbel M.*: Określenie trwałości mostów drogowych. *Mosty*, 2, 2007, 40-54
- [23] *Czudek H., Wysokowski A.*: Trwałość mostów drogowych. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005
- [24] *Wichtowski B.*: Nośność stalowych mostów kolejowych z drugiej połowy XIX wieku - uwagi dyskusyjne. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **13**, 3, 2014, 261-269
- [25] *Lee J., Lee Y., Kim H., Sim S., Kim J.*: A new methodology development for flood fragility curve derivation considering structural deterioration for bridges. *Smart Structures and Systems*, **17**, 1, 2016, 149-165
- [26] *Kallias A., Imam B., Chryssanthopoulos M.*: Performance profiles of metallic bridges subject to coating degradation and atmospheric corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering, Forthcoming Special Issue: Bridge Design, Assessment and Monitoring*, 2016, 1-14
- [27] *Wysokowski A.*: Trwałość mostów stalowych w funkcji zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych. *Studia i Materiały*, zeszyt 53, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 2001
- [28] *Wysokowski A.*: Zmęczenie i korozja – wyznacznik trwałości eksploatacyjnej mostów stalowych. *Wrocławskie Dni Mostowe. Mosty stalowe. Projektowanie, technologie budowy, badania, utrzymanie*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2008, 369-379
- [29] *Kwon K., Frangopol D., Soliman M.*: Probabilistic Fatigue Life Estimation of Steel Bridges by Using a Bilinear S-N Approach. *Journal of Bridge Engineering*, **17**, 1, 2012, 58-17
- [30] *Kumar P., Imam B.*: Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure. *Science of The Total Environment*, **444**, 2013, 85-101
- [31] *Duchaczek A., Mańko Z.*: Application of the numerical methods to assessment of the fatigue life of steel military bridges. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **13**, 1, 2014, 23-32
- [32] *Łagoda G., Łagoda M.*: Nowe typy konstrukcji w mostownictwie w XX wieku. *Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie*, **13**, 4, 2007, 36-41
- [33] *Bień J., Kuźawa M.J.*: Assessment of time-dependent load capacity of corroded bridge plate girders, in: *Progress in steel and composite structures: proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Metal Structures*, Wrocław, Poland, 15-17 June 2011. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2011, 356-363
- [34] *Bień J.*: Systemowe wspomaganie zarządzania mostami drogowymi i kolejowymi. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, zeszyt 59, 2012, 49-68
- [35] *Bień J., Rawa P., Bień B.*: Komputerowe wspomaganie zarządzania autostradowymi obiektami mostowymi. *Inżynieria i Budownictwo*, 11, 2001, 669-672
- [36] *Love P., Edwards D., Smith J.*: Systemic life cycle design error reduction model for construction and engineering projects. *Structure and Infrastructure Engineering*, **9**, 7, 2013, 689-701
- [37] *Kogler R.*: *Steel Bridge Design Handbook: Corrosion Protection of Steel Bridges*. Publication No. FHWA-HIF-16-002-Vol.19, U.S. Department of Transportation, 2015
- [38] *Biliszczuk J., Onysyk J., Sadowski K., Toczkiwicz R., Zabawa E.*: Propozycja zmian w zarządzaniu infrastrukturą mostową. *Wrocławskie Dni Mostowe. Trwałość obiektów mostowych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2012, 79-95
- [39] *Chmielewski R., Kruszk L., Więclaw-Bator L.*: Ekspertyzy, opinie techniczne i przeglądy specjalne drogowych i kolejowych obiektów mostowych. WAT, 2005-2016