

Zapasy trwałości eksploatacyjnej wybranych mostów stalowych w aspekcie modernizacji krajowej infrastruktury kolejowej

Service life reserves of selected steel bridges in the aspect of modernization polish railroad infrastructure

DOI: 10.15199/33.2023.05.11

Streszczenie. W ramach modernizacji krajowej infrastruktury kolejowej realizowanych jest wiele spektakularnych konstrukcji mostowych z zastosowaniem stali. Są to często budowle rekordowe pod względem rozpiętości przęseł i/lub długości całkowitej. Właściwa dbałość o uwzględnienie zagadnień trwałości przyczyni się do realizacji obiektów pozwalających na ich długą, bezpieczną eksploatację (bez częstych remontów), przy niewielkich kosztach utrzymania. Właściwa analiza czynników mających wpływ na trwałość umożliwia np. częściową eliminację błędnych rozwiązań materiałowych lub konstrukcyjnych. Takie podejście wpisuje się w zasady zrównoważonego rozwoju oraz wyróżnia pod względem zalet ekologicznych.

Artykuł ma na celu przedstawienie zagadnień dotyczących trwałości eksploatacyjnej kolejowych obiektów mostowych. Ponadto zaprezentowano czynniki wpływające na trwałość mostów stalowych oraz zagadnienia związane ze zrównoważonym rozwojem, w aspekcie ochrony środowiska i zasobów naturalnych.

Słowa kluczowe: trwałość mostów stalowych; mosty kolejowe; modernizacja infrastruktury; zrównoważony rozwój.

Abstract. As part of the modernization of the Polish rail infrastructure, many spectacular bridge structures using steel are being built. These are often record-breaking structures in terms of span and/or overall length. Proper attention to the consideration of durability issues will contribute to the realization of structures that allow their long, safe operation (without frequent repairs), with low maintenance costs. Proper analysis of factors affecting durability makes it possible, for example, to partially eliminate faulty material or construction solutions. This approach is in line with the principles of sustainable development and stands out in terms of ecological advantages. The article aims to present issues concerning the operational durability of railroad bridges. In addition, factors affecting the durability of steel bridges are presented, as well as issues related to sustainable development, in terms of environmental protection and natural resources.

Keywords: durability of steel bridges; railroad bridges; infrastructure modernization; sustainable development.

Stal jest powszechnie stosowana w budownictwie (również mostowym) ze względu na ogólnie znane jej zalety. Byłyby to doskonały konstrukcyjny materiał budowlany, gdyby nie dwie główne wady: podatność na korozję i podatność na zmęczenie. Uwydatniają się one przede wszystkim w przypadku konstrukcji mostowych ze względu na niesprzyjające warunki środowiskowe, w których są eksploatowane, przy jednocześnie zmiennych obciążeniach od ruchu drogowego i kolejowego.

Na etapie koncepcji, projektowania i wykonawstwa konstrukcji – przy obecnym stanie wiedzy oraz znajomości nowoczesnych materiałów i technologii – można te czynniki wyeliminować bądź

ograniczyć do minimum ich oddziaływanie w czasie eksploatacji. W tym celu stosuje się, co nie zawsze jest powszechną praktyką, ochronę konstrukcyjną i materiałową. Można tak ukształtować i wykonać konstrukcję mostu stalowego, aby ograniczyć zjawisko korozji, bądź też użyć odpowiedniego materiału, np. stali z grupy trudno rdzewiejących. Podobnie w przypadku zmęczenia, już na etapie konstruowania obiektu, można znacznie ograniczyć to zjawisko, aby nie wystąpiło w późniejszym okresie eksploatacji mostu [1].

Właściwości użytkowe obiektu mostowego w trakcie jego eksploatacji pogarszają się ze względu na nieuniknione procesy starzeniowe i czynniki funkcjonalne, na które nie mamy wpływu. Możemy mieć natomiast, i mamy, wpływ na poziom utrzymania infrastruktury i wchodzących w jej skład eksploato-

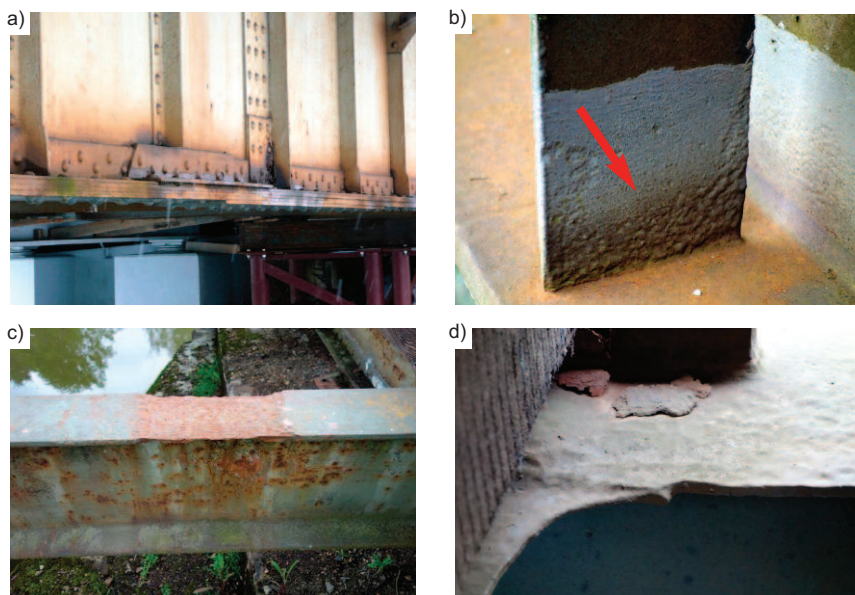
wanych obiektów mostowych. Zagadnienie to zarówno w Polsce, jak i wielu innych krajach stanowi ogromny problem od wielu dekad. Wpływ wybranych czynników na trwałość oraz skutki ich oddziaływania na elementy konstrukcji mostów stalowych przedstawiono na fotografii 1.

Kolejowe obiekty mostowe stanowią ważny dorobek wielu pokoleń ludzkości. Z dekady na dekadę, udział procentowy mostów o konstrukcji stalowej sukcesywnie się zwiększa – szczególnie biorąc pod uwagę statystykę obiektów o dużej rozpiętości.

Podstawowe czynniki wpływające na trwałość kolejowych mostów stalowych

Trwałość określa się jako zdolność konstrukcji do spełniania minimum swojej funkcji przez okres planowane-

¹⁾ Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budownictwa; awysokowski@infra-kom.eu



Fot. 1. Przykłady uszkodzeń korozyjnych newralgicznych miejsc dźwigarów blachownicowych mostów kolejowych: a i b) strefy połączenia środnika z półką dolną na skutek kumulowania się negatywnych czynników atmosferycznych i zanieczyszczeń; c) półki górnej dźwigara mostu kolejowego wyłączonego z eksploatacji w strefie oparcia mostownicy; d) blachy węzłowej łączącej stężenie z pasem górnym dźwigara w strefie mostownicy

Fig. 1. Examples of corrosion damage to sensitive areas of girders of plate girders of railroad bridges: a and b) the zone of connection between the web and the bottom flange due to the accumulation of negative atmospheric factors and contaminants; c) the top flange of the girder of a railroad bridge out of service in the zone of support of the girder; d) the gusset plate connecting the brace to the top flange of the girder in the zone of the girder

go użytkowania i w przewidzianych warunkach, bez konieczności ponoszenia nadmiernych kosztów napraw i konserwacji [2], co wiąże się jednocześnie ze spełnianiem głównych założeń zrównoważonego rozwoju. **Konstrukcje, w tym mostowe, należy projektować z uwzględnieniem wymagań stanu granicznego nośności oraz użytkowania.** W praktyce wiąże się to z tym, że nie mogą wystąpić sytuacje, w których konstrukcja jest niedostatecznie wytrzymała lub stateczna, a także w których występują warunki uniemożliwiające użytkowanie obiektu zgodnie z jego przeznaczeniem. Wymagania te dotyczą nie tylko całych konstrukcji, ale także ich elementów i konstrukcji w trakcie wznoszenia.

Trwałość eksploatacyjna obiektu mostowego – w tym o konstrukcji stalowej – jest funkcją, którą tworzą zależne od siebie:

- dokumentacja projektowa i jakość projektowania;
- sposób i jakość wykonania obiektu oraz połączeń elementów konstrukcyjnych;

- oddziaływania, m.in. obciążenia obiektu mostowego (w tym ponadnormatywne);
- warunki środowiskowe eksploatacji obiektu;
- poziom utrzymania i częstotliwość wykonywania właściwych przeglądów technicznych,
- poziom jakości prac i zabiegów utrzymaniowych, a także rewitalizacyjnych i remontowych oraz właściwy odbiór tych prac przy odpowiednich nakładach finansowych.

Wzajemna zależność poszczególnych czynników jest kluczowa w celu zapewnienia odpowiedniej trwałości obiektu mostowego. Należy mieć świadomość,

że docelowa trwałość użytkowa jest determinantem każdego z tych czynników z osobna. Eksploatowane w kraju kolejowe stalowe obiekty mostowe są często zaawansowane wiekowo i w związku z tym charakteryzują się m.in. przestarzalemi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, które są szczególnie „wrażliwe” na działanie korozji i zmęczenia. W tabeli 1 zestawiono istotne czynniki mające bezpośredni wpływ na trwałość stalowych konstrukcji mostowych.

Ważnym zagadnieniem jest zapewnienie odpowiedniej trwałości konstrukcji mostów stalowych, m.in. jakości wykonanych połączeń konstrukcyjnych na etapie ich eksploatacji. Ma to szczególne znaczenie w przypadku realizowanej obecnie modernizacji wielu linii kolejowych w naszym kraju oraz obiektów inżynierskich znajdujących się w ich ciągach.

W artykule omówiono syntetycznie przykłady rzeczywistych rezerw trwałości doraźnej i zmęczeniowej eksploatowanych konstrukcji mostów stalowych.

Przykłady rezerw trwałości konstrukcji mostów stalowych przebadanych w terenie

Projektowanie nowych oraz przebudowa i remonty już użytkowanych konstrukcji kolejowych mostów stalowych jedynie pod względem wytrzymałości nie wystarcza, aby zapewnić długowieczność tych obiektów. Dotyczy to wielu modernizowanych i przebudowywanych odcinków linii kolejowych, w tym magistralnych. Problematyka szacowania trwałości mostów w ujęciu trwałości doraźnej i zmęczeniowej jest niezwykle ważnym zagadnieniem. Wynika to z wielu czynników mających bezpośredni wpływ zarówno na nośność, jak i trwałość, a także na bezpie-

Tabela 1. Istotne czynniki mające wpływ na trwałość obiektów mostowych

Table 1. Important factors affecting the durability of bridges

Materiał elementów konstrukcyjnych	Problemy eksploatacyjne
Stal	• zjawiska korozyjne: korozja powierzchniowa; korozja wżerowa; korozja szczelinowa; korozja naprężeniowa; • zmęczenie; • problemy z połączeniami elementów konstrukcyjnych; • imperfekcje wykonawcze
Beton (w mostach o konstrukcji zespolonej, stalowo-betonowej)	• zjawiska korozyjne: korozja spowodowana karbonatyzacją; korozja spowodowana chlorkami; • mrozoodporność betonu; • reaktywność alkaliczna kruszywo/cement • agresja chemiczna gruntów lub wody gruntowej (w konstrukcjach fundamentów); • zjawisko skurczu i pęcznienia

czeństwo konstrukcji stalowych szczególnie w przypadku ich remontów i przebudowy. W związku z tym zostały one opisane w wielu specjalistycznych publikacjach oraz zaleceniach i dokumentach normalizacyjnych. Trwałość doraźna i zmęczeniuwa wpływa na żywotność mostów. Trwałość doraźna dotyczy obciążeń, które wprowadzane są na most w krótkim czasie, natomiast trwałość zmęczeniuwa to liczba dopuszczalnych cykli obciążeń.

Badanie rezerw trwałości doraźnej i zmęczeniuwej. Korzystając z opracowanych sposobów wyznaczenia rezerw trwałości doraźnej i zmęczeniuwej, na potrzeby artykułu przeprowadzono obliczenia dotyczące kilku wybranych, przebadanych pod obciążeniem próbnym, stalowych konstrukcji obiektów mostowych będących obecnie w ciągłej eksploatacji. Mosty wytypowane do badań różnią się konstrukcją, sposobem podparcia oraz rozwiązaniem materiałowym. Porównanie uzyskanych wyników może dostarczyć cennych informacji na temat wpływu warunków eksploatacyjnych na trwałość i wytrzymałość różnych konstrukcji mostów. W celu poprawy czytelności przeprowadzanych analiz, do obliczeń wybrano wyniki jedynie głównych elementów konstrukcji omawianych mostów.

W tabeli 2 zamieszczono schematy pomiarowe i przekroje poszczególnych mostów, które oznaczono jako M1– M4 i wyszczególniono badane elementy z opisem miejsc prowadzonych pomiarów. Zestawiono także wartości względne pomierzonych wielkości statycznych $\sigma_{\text{pom}}/\sigma_{\text{proj}}$ we wszystkich miejscach prowadzenia pomiarów (wartości pomierzone w stosunku do wartości naprężeń projektowych na podstawie badań pod obciążeniem próbnym).

W celu określenia rzeczywistych rezerw trwałości zmęczeniuwej przeanalizowano wyniki uzyskane w przypadku wyszczególnionych elementów konstrukcji przebadanych obiektów mostowych. Zgodnie z coraz częściej stosowaną w praktyce normą PN-EN 1993-2 [3], oceny stanu zmęczenia rozpatrywanego elementu kon-

Tabela 2. Zestawienie przebadanych mostów i wartości względne pomierzonych wielkości statycznych na podstawie badań pod obciążeniem próbnym (zapasy nośności doraźnej) [1]
Table 2. Summary of bridges tested and relative values of measured static quantities based on tests under proof load (ad hoc load stocks) [1]

Konstrukcja mostowa	Schemat pomiarowy	Badany element konstrukcyjny	Wartość nośności rzeczywistej w odniesieniu do nośności projektowej $\sigma_{\text{pom}}/\sigma_{\text{proj}}^1$ [%]
MOST M1 – most kolejowy o konstrukcji zespolonej w ciągu linii magistralnej E20		tor nr 1 dźwigar skrajny L/2	50,4
		tor nr 1 dźwigar środkowy L/2	62,7
		tor nr 2 dźwigar skrajny L/2	50,3
		tor nr 2 dźwigar środkowy L/2	57,9
MOST M2 – most drogowy o konstrukcji zespolonej w ciągu drogi wojewódzkiej		przęsło środkowe nr 3 dźwigar skrajny L/2	99,6
		przęsło skrajne nr 2 dźwigar skrajny L/2	96,4
MOST M3 – most kolejowy o konstrukcji zespolonej w ciągu linii magistralnej E30		przęsło nr 4 dźwigar skrajny L/2	77,8
		przęsło nr 4 dźwigar środkowy L/2	81,2
		przęsło nr 2 dźwigar skrajny L/2	71,6
		przęsło nr 2 dźwigar środkowy L/2	76,2
MOST M4 – most kolejowy o konstrukcji stalowej gruntowo-powłokowej w ciągu linii magistralnej E30		tor nr 2 L/2 rozpiętości przęsła środek przęsła	57,4
		tor nr 2 L/2 rozpiętości przęsła oś toru nr 2	48,7

¹⁾ σ_{pom} – pomierzone naprężenia w czasie badań;
 σ_{proj} – wartości projektowe naprężeń

strukcji w przypadku normowego „okresu życia” dokonuje się wg wyrażenia, związanego z naprężeniami normalnymi, bądź ścinającymi:

$$\gamma_{FF} \Delta \sigma_{E2} \leq \Delta \sigma_c / \gamma_{Mf} \quad (1)$$

gdzie:

γ_{FF} – częściowy współczynnik dla obciążeń zmęczeniowych;

$\Delta \sigma_{E2}$ – równoważna amplituda naprężeń odniesiona do 2×10^6 cykli zmian naprężeń stacjonarnych;

$$\Delta \sigma_{E2} = \lambda \Phi_2 \Delta \sigma_p \quad (2)$$

gdzie:

λ – współczynnik uszkodzenia równoważnego (zależy od typu dźwigara, długości linii wpływu, intensywności ruchu, przewidywanego okresu eksploatacji mostu itp.);

Φ_2 – współczynnik dynamiczny równoważnego uszkodzenia;

$\Delta \sigma_p$ – projektowy zakres naprężeń;

$\Delta \sigma_c$ – wytrzymałość zmęczeniowa odczytana z tabel (krzywych wytrzymałości zmęczeniowej) dla występującego typu karbu wg normy PN-EN 1993-1-9 [4];

γ_{Mf} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla wytrzymałości zmęczeniowej.

W celu przeprowadzenia odpowiednich analiz trwałości elementów konstrukcji mostów na potrzeby artykułu wygodniej jest skorzystać z metody przedstawionej w [1, 5, 6]. Bazuje ona na tych samych założeniach co sposób określony wg normy PN-EN 1993-2 [3]. **Trwałość zmęczeniową T (lata)** określa się ze wzoru wyprowadzonego w [6]:

$$T = 10^a / (\Delta \sigma_n^m \cdot 365 \cdot N_{\Delta n}^d) \quad (3)$$

gdzie:

T – trwałość zmęczeniowa mostu wyrażona w latach;

a – parametr krzywej wytrzymałości zmęczeniowej (zależny od typu karbu), wrażliwość zmęczeniowa;

$\Delta \sigma_n$ – zakres naprężeń wywołany obciążeniem normowym;

$N_{\Delta n}^d$ – równoważna zastępcza liczba cykli o zakresach naprężeń wywołanych obciążeniem normowym na dobę;

m – współczynnik nachylenia krzywych zmęczeniowych.

Porównując teoretyczną trwałość normową T_n (jaką założył projektant w dokumentacji projektowej) z trwałością rzeczywistą T_1 analizowanych spoin z imperfekcjami jakościowymi (nieciągłością – ubytkami w analizowanym przekroju), otrzymujemy:

$$T_1 / T_n = (\sigma_1)^m / (\sigma_n)^m \quad (4)$$

Korzystając z opisanego sposobu wyznaczania spadku trwałości, przeprowadzono obliczenia przedstawione w tabeli 3.

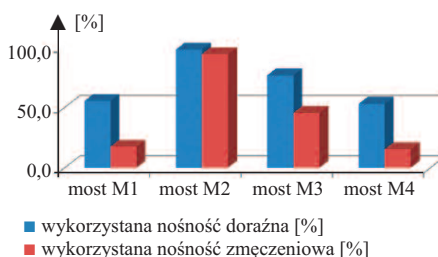
Tabela 3. Wyniki analizy rezerw trwałości zmęczeniowej przebadanych mostów [1]
Table 3. Results of fatigue life reserve analysis of the tested bridges [1]

Konstrukcja mostowa	Badany element konstrukcyjny	Wartość nośności rzeczywistej w odniesieniu do nośności projektowej $\sigma_{pom} / \sigma_{proj}$ [%]	Wykorzystana trwałość zmęczeniowa w całym projektowanym okresie eksploatacji	
			[lata]	[%]
Most M1	dźwigar skrajny	50,4	15	12,8
	dźwigar środkowy	62,7	30	24,6
	dźwigar skrajny	50,3	15	12,7
	dźwigar środkowy	57,9	23	19,4
Most M2	dźwigar skrajny	99,6	119	98,8
	dźwigar skrajny	96,4	108	89,6
Most M3	dźwigar skrajny	77,8	57	47,1
	dźwigar środkowy	81,2	64	53,5
	dźwigar skrajny	71,6	44	36,7
	dźwigar środkowy	76,2	53	44,2
Most M4	blacha falista w osi toru	57,4	23	18,9
	blacha falista w osi toru	48,7	14	11,6

Analiza wyników badań

Na podstawie analizy wyników obliczeń teoretycznych zamieszczonych w tabelach 2 i 3 stwierdzono duże różnice w wykorzystaniu nośności doraźnej przebadanych konstrukcji mostowych. Najmniejsza jest w przypadku mostu M4 i wynosi ok. 50%. Wynika to m.in. z typu konstrukcji (gruntowo-powłokowa), charakteryzującej się dużą trwałością i sztywnością. Największe wykorzystanie nośności doraźnej zanotowano w przypadku zespolonego mostu M2 o konstrukcji ciągłej, gdzie praktycznie nośność dźwigara skrajnego jest w pełni wykorzystana (brak zapasów).

Analizując wartości zestawione w dwóch ostatnich kolumnach tabeli 3, stwierdzono małe wykorzystanie trwałości zmęczeniowej, jeśli rozpatruje się cały projektowany okres eksploatacji. Wyniki przeprowadzonych analiz w aspekcie wykorzystanej nośności doraźnej i zmęczeniowej przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wyniki przeprowadzonych analiz w aspekcie wykorzystanej nośności doraźnej i zmęczeniowej mostów M1 – M4

Fig. 2. Results of the analyses carried out in terms of the used load-bearing and fatigue capacity of bridges M1 – M4

W przypadku większości badanych mostów wykorzystanie nośności zmęczeniowej jest znacznie mniejsze niż nośności doraźnej. Najmniejsze wykorzystanie trwałości zmęczeniowej w stosunku do normowej odnotowano w przypadku mostów M4 i M1. Wynosi ono odpowiednio 11,6% oraz 12,7%. Można to wytłumaczyć masowością elementów konstrukcyjnych mostów stalowych.

Analizy uprzednio wykonanych badań wykazały, że wartości zarejestrowanych naprężeń są mniejsze od projektowych przyjmowanych do obliczeń zmęczeniowych, co jest zjawiskiem ogólnie znanym. W wielu przypadkach naprężenia te są znacznie mniejsze od projektowych i różnica wynosi nawet ok. 50%. Z tego względu mamy do czynienia ze znacznym zmniejszeniem zagrożeń zmęczeniowych w przypadku konstrukcji mostowych. **W rzeczywistych eksploatowanych obiektach mostowych (przynajmniej w ich dużej części) zagrożenie zmęczeniowe jest znacznie mniejsze, niż wynikałoby to z obliczeń analitycznych.** Istnienie wykazanych zapasów tłumaczy, dlaczego wiele zaniebdanych obiektów mostowych pod kątem utrzymania, często też przeciążonych, z różnymi uszkodzeniami konstrukcyjnymi, jest nadal eksploatowanych bez jakichkolwiek oznak pęknięć zmęczeniowych.

Podsumowanie i wnioski

W przypadku modernizacji wielu obiektów kolejowych analizę ich nośności należy przeprowadzić w spo-

sób indywidualny ze szczególnym uwzględnieniem trwałości zmęczeniowej. Warto mieć na uwadze, że konstrukcje te są zazwyczaj eksploatowane przez co najmniej kilkadziesiąt lat, i w celu właściwej oceny zapasów ich nośności trzeba odpowiednio modyfikować współczynniki bezpieczeństwa. Możliwe jest odejście od tradycyjnych analiz obliczeniowych przez odpowiednią modyfikację np. współczynników materiałowych. Pozwala to niejednokrotnie na uzyskanie znacznych efektów ekonomicznych wynikających często ze zmiany zakresu niezbędnego remontu, przebudowy lub wzmocnienia. Na etapie wykonywania oceny stanu technicznego i obliczeń przed procesem projektowania konieczne jest interdyscyplinarne podejście do zagadnień związanych z **trwałością eksploatacyjną obiektu mostowego**.

Zagrożenie zmęczeniowe mostów zazwyczaj może być znacznie mniejsze, niż wynikałoby to z obliczeń analitycznych z kilku powodów. Po pierwsze, obliczenia analityczne bazują na idealnych modelach matematycznych, które nie uwzględniają wszystkich czynników wpływających na zachowanie się konstrukcji mostów w warunkach rzeczywistych. Po drugie, konstrukcje mostów są zwykle projektowane z zapasem bezpieczeństwa, który uwzględnia niewielkie zmiany w obciążeniach i warunkach eksploatacyjnych. Po trzecie, nowoczesne technologie i materiały stosowane w budowie mostów są odporne na zmęczenie, co przyczynia się do zmniejszenia ryzyka uszkodzeń. Wszystkie te czynniki wpływają na zmniejszenie zagrożenia zmęczeniowego mostów. Oznacza to, że rzeczywiste ryzyko uszkodzenia jest znacznie mniejsze, niż wynikałoby z obliczeń analitycznych. Niemniej jednak, regularne kontrole techniczne mostów i ciągłe ulepszanie technologii oraz materiałów stosowanych w ich budowie są niezbędne, aby utrzymać ich bezpieczeństwo i wytrzymałość w czasie. Ma to również wpływ na zmniejszenie kosztów utrzymania. Nieuwzględnienie aspektów trwałościowych na wstępnym etapie procesu inwestycyjnego wymusza konieczność wykonywania kolejnych, często kosztownych prac w trakcie eksploatacji obiektu mostowego. Ma to

wpływ na zachowanie ciągłości ruchu kolejowego podczas użytkowania mostu, a w efekcie implikowanie kolejnych dużych kosztów pośrednich i społecznych.

Należy mieć świadomość, że duża liczba stalowych obiektów kolejowych ma charakter historyczny i co cenne – przetrwały one do naszych czasów, często pozostając w dalszej eksploatacji (fotografia). Można zaryzykować stwierdzenie, że z pewnością przyczyniła się do tego ich duża trwałość [7]. Jest to zgodne z przewidywaniami na podstawie doświadczeń autorów wielu prac



Historyczny, najdłuższy w Europie most kolejowy (obecnie most w ciągu systemu tras rowerowych województwa lubuskiego)

The historic, longest railroad bridge in Europe (now a bridge within the Lubuskie voivodeship's bicycle route system)

naukowych [1, 6, 8 – 19]. Natomiast w tym przypadku istotna jest znaczna wielkość przewidywanych spadków trwałości zmęczeniowej. Bagatelizowanie tego zagadnienia, szczególnie przy intensywnym, cyklicznym eksploatacyjnym obciążeniu kolejowym, może prowadzić do pęknięć zmęczeniowych, a tym samym koniecznych awaryjnych napraw, często obiektów niedawno oddanych do użytkowania.

W celu właściwego oszacowania stopnia wyeksploatowania obiektów i ich liczby na podstawie analizy porównawczej ich nośności doraźnej i zmęczeniowej mogą być użyteczne metody i algorytmy opracowane w pracach [6, 20, 21].

Literatura

- [1] Wysokowski A. Trwałość mostów stalowych. 2022. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [2] Brandt AM. Trwałość obiektów inżynierskich a zrównoważony rozwój. Drogi Łądowe, Powietrzne, Wodne. 2008; 10: 93 – 107.
- [3] PN-EN 1993-2:2010 Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 2: Mosty stalowe.
- [4] PN-EN 1993-1-9:2007 Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-9: Zmęczenie.
- [5] Czudek H, Wysokowski A. Trwałość mostów drogowych. 2005. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa.

[6] Wysokowski A. Trwałość mostów stalowych w funkcji zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych. IB-DiM Studia i Materiały. 2001. Zeszyt nr 53, Warszawa.

[7] Wysokowski A. Trwałość mostów stalowych w aspekcie modernizacji krajowej infrastruktury kolejowej. Nowoczesne Technologie i Systemy Zarządzania w Transporcie Szynowym NOVKOL Zakopane. 2022. ISBN 978-83-63492-18-2.

[8] Czerepak A, Czudek H, Pryga A, Wysokowski A. Metoda szacowania wpływu korozji na nośność konstrukcji stalowych drogowych obiektów mostowych. 2003. Zalecenia GDDKiA, IBDiM, Żmigród.

[9] Rykaluk K. Pęknięcia w konstrukcjach stalowych. 2000. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.

[10] Rymusza J. Trwałość i model degradacji obiektu mostowego. Inżynieria i Budownictwo. 1995; 10.

[11] Wichtowski B. Wnioski z badań blachownicowych mostów kolejowych z pęknięciami w złączach spawanych. Inżynieria i Budownictwo. 2000; 10.

[12] Wysokowski A. Fatigue of structural elements in steel bridges – theory and practice, XIII International Conference on Metal Structures ICMS 2016, Zielona Góra.

[13] Sharifi Y, Rahgozar R. Fatigue notch factor in steel bridges due to corrosion, Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2009; Vol. IX, No. 4.

[14] Li CQ, Li L, Mahmoodian M, Shi W. Corrosion Induced Degradation of Fatigue Strength of Steel in Service for 128 Years. Structures. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.11.013>.

[15] Li CQ, Li L, Mahmoodian M. Prediction Of Fatigue Failure Of Steel Beams Subjected To Simultaneous Corrosion And Cyclic Loading. Structures. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.02.003>.

[16] Li L, Mahmoodian M. Fatigue Life Prediction and Maintenance Management of Steel Structures Subjected to Corrosion. Australian Journal of Civil Engineering 2021; <https://doi.org/10.1080/13287982.2021.1999041>.

[17] Macho M, Matos JC, Ryjacek P. Fatigue Life Analysis of Steel Riveted Rail Bridges Affected by Corrosion. Structural Engineering International. 2019; <https://doi.org/10.1080/10168664.2019.1612315>.

[18] Macho M, Matos JC, Ryjacek P. Static and Fatigue Test on Real Steel Bridge Components Deteriorated by Corrosion. International Journal of Steel Structures. 2018; <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0099-6>.

[19] Zobel H, Alkhafaji T, Wróbel M. Określanie trwałości mostów drogowych. Mosty. 2007; 2.

[20] Sharifi Y, Rahgozar R. Remaining fatigue life of corroded steel structural members. Advances in Structural Engineering. 2011; <https://DOI:10.1260/1369-4332.14.5.881>.

[21] Wysokowski A, Howis J, Wagner J. Przykład praktycznego uwzględniania zjawisk korozji i zmęczenia dla zabytkowego mostu zespolonego. 2009. Konferencja Naukowo-Techniczna Zespolone Konstrukcje Mostowe. Politechnika Krakowska s. 564-574, Kraków.

Przyjęto do druku: 17.04.2023 r.