

Ocena trwałości zmęczeniowej 100-letniego mostu kolejowego o nitowanej konstrukcji kratownicowej

Fatigue assessment of 100 years old riveted truss railway bridge



Tomasz Siwowski

Prof. dr hab. inż.

Politechnika Rzeszowska, Katedra
Dróg i Mostów

siwowski@prz.edu.pl



Mateusz Rajchel

Dr hab. inż., Prof. Uczelni

Politechnika Rzeszowska, Katedra
Dróg i Mostów

mrajchel@prz.edu.pl

Streszczenie: Zmęczenie materiału to jeden z najczęstszych powodów uszkodzeń istniejących stalowych mostów kolejowych, zwłaszcza nitowanych. Dlatego procedura oceny trwałości zmęczeniowej jest jedną z najistotniejszych w kompleksowej ocenie nośności i trwałości istniejących mostów. Niezawodna ocena trwałości zmęczeniowej jest zazwyczaj decydująca przy szacowaniu przydatności eksploatacyjnej mostu. W pracy przedstawiono przykład oceny trwałości zmęczeniowej kratownicowego mostu kolejowego, bazującej na europejskiej procedurze opartej na Eurokodach. Procedura wykorzystuje metodę bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej w konwencji naprężeń nominalnych. Ocena trwałości zmęczeniowej wykazała, że trwałość zmęczeniowa konstrukcji stalowej mostu jest już praktycznie wyczerpana, a dalsza żywotność zmęczeniowa konstrukcji jest zerowa. Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonej oceny mostu kolejowego jednoznacznie wykazano, że istniejąca konstrukcja stalowa nie nadaje się do wykorzystania w planowanej modernizacji / przebudowie mostu oraz do dalszej eksploatacji w planowanym 50-letnim okresie życia technicznego konstrukcji.

Słowa kluczowe: Most kolejowy; Konstrukcja stalowa; Kratownica; Połączenia nitowane; Trwałość zmęczeniowa

Abstract: Fatigue is one of the most often reasons for failure in existing steel bridges, particularly with riveted structure. Therefore fatigue assessment is always the most important part of the complex evaluation of existing steel bridges. The reliable fatigue assessment is often decisive in the estimation of the remaining service life of a bridge. The example of a comprehensive fatigue assessment of 100 years old riveted truss railway bridge, based on European procedures and codes, has been presented in the paper. The applied procedure is based on the safe life method in the convention of nominal stresses. The bridge assessment revealed, that the remaining fatigue strength was almost exhausted and the further service life of the bridge was close to zero. Taking into account the assessment results it was also revealed, that the existing riveted truss superstructure was not suitable for further use in the railway bridge after its rehabilitation, which aimed to extend the bridge service life by the next 50 years

Keywords: Railway bridge; Steel structure; Truss, riveted joints; Fatigue life

Wstęp

Większość dużych mostów kolejowych, wybudowanych w Polsce w pierwszej połowie XX wieku oraz bezpośrednio po II wojnie światowej, to stalowe kratownice nitowane. Pomimo znaczącego wzrostu obciążeń mostów kolejowych na przestrzeni kilkudziesięciu lat w stosunku do obciążeń projektowych znakomita większość tych mostów jest nadal w eksploatacji dzięki przeprowadzonym w okresie dotychczasowej eksploatacji remontom, wzmocnieniom i modernizacjom ich konstrukcji, które miały na celu prze-

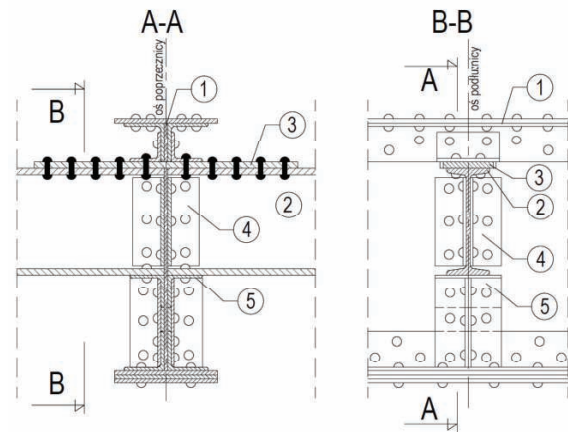
dłużenie przydatności użytkowej i trwałości eksploatacyjnej mostów o kolejne 20-30 lat. Analiza dokumentów utrzymaniowych tych mostów pokazuje, że większość z nich jest w dobrym stanie technicznym, nawet pomimo zaawansowanej korozji w niektórych przypadkach. Mosty te bez problemu przenoszą znacznie większe obciążenia eksploatacyjne, niż te na które je zaprojektowano. Przeprowadzone w wielu przypadkach pomiary naprężeń wykazały, że ich wartości są znacznie niższe od wytrzymałości obliczeniowych stali, a szczegółowe inspekcje nie wykryły poważnych pęknięć zmęczeniowych

w głównych elementach konstrukcji. Wydawałoby się zatem, że decyzje o wydłużeniu przydatności użytkowej tych mostów oraz środki wydane na ich dostosowanie do współczesnych wymagań eksploatacyjnych są racjonalne.

Jednakże katastrofa mostu drogowego przez Missisipi w Minneapolis, USA [5] oraz badania prowadzone w Europie w ramach kilku unijnych projektów badawczych (m.in. Long Life Bridges, I-SAMCO, Sustainable Bridges) wskazały główne obszary niepewności i ryzyka, związane z przedłużającą się eksploatacją stalowych mostów kolejowych. Są to



1. Widok ogólny mostu kolejowego przez Odrę w Opolu



2. Połączenie podłużnicy z poprzecznicy: (1) poprzecznicę, (2) podłużnicę, (3) nakładka uciągająca podłużnicę, (4) kątowniki łączące środek podłużnicy ze środkiem poprzecznic, (5) stołeczek podpierający podłużnicę.

m.in.: parametry materiałowe dawnych stali (starzenie, odporność na kruche pękanie), wytrzymałość zmęczeniowa połączeń nitowanych, stateczność blach węzłowych w połączeniach, stan techniczny konstrukcji (korozja), itp. Wszystkie ww. obszary niepewności pokazują jak ważnym problemem jest ocena trwałości zmęczeniowej w ocenie stanu technicznego oraz dalszej przydatności eksploatacyjnej stalowych mostów kolejowych o konstrukcji nitowanej. Brak skutecznych metod NDT do oceny stanu połączeń nitowanych (np. wykrywających pęknięcia pod blachami węzłowymi) utrudnia rzetelną ocenę trwałości i przydatności eksploatacyjnej tych mostów. W konsekwencji projekty obejmujące naprawę, wzmocnienie i modernizację istniejących stalowych mostów kolejowych nie uwzględniają problemów, związanych z ich ograniczoną lub wyczerpaną trwałością zmęczeniową. Dlatego obecnie postuluje się, aby przed podjęciem decyzji o przedłużeniu okresu eksploatacji istniejącego mostu przeprowadzić każdorazowo szczegółową analizę trwałości zmęczeniowej wyeksploatowanej konstrukcji [1], [2], [6], [7].

W Polsce od początku lat 80-tych ubiegłego wieku powstało wiele prac naukowych, w których przedstawiono różne metody szacowania trwałości istniejących mostów stalowych, m.in. [3], [4], [17], [18].

Jednakże w świetle stałego rozwoju wspólnego europejskiego rynku robót budowlanych i usług inżynierskich istnieje potrzeba harmonizacji różnych procedur i stworzenia akceptowanych zaleceń, dotyczących oceny bezpieczeństwa i trwałości istniejących obiektów mostowych. Odpowiedzią na to zapotrzebowanie są europejskie wytyczne [8], bazujące na Eurokodach i będące podstawą dla przyszłych norm europejskich w zakresie prognozowania trwałości zmęczeniowej mostów istniejących. Zalecaną w europejskich wytycznych procedurę oceny trwałości zmęczeniowej autorzy wykorzystali już kilkakrotnie do oceny stalowych mostów drogowych o kratownicowej konstrukcji nitowanej [14], [15], [16].

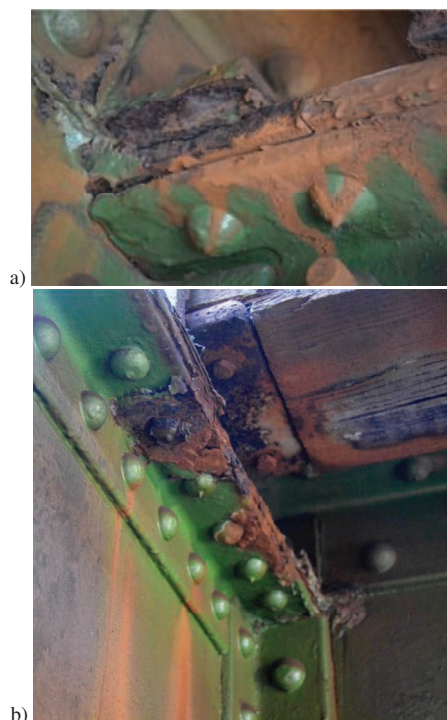
W artykule przedstawiono ocenę trwałości zmęczeniowej i przydatności eksploatacyjnej 100-letniego mostu kolejowego przez Odrę w Opolu o nitowanej konstrukcji kratownicowej przy zastosowaniu procedury zalecanej w wytycznych [8]. Most kolejowy przez Odrę w Opolu jest położony w km 100,106 linii kolejowej nr 132, łączącej Bytom z Wrocławiem. Linia ta jest fragmentem linii magistralnej E 30, leżącej w III Paneuropejskim Korytarzu Transportowym. PKP PLK chcą podnieść parametry eksploatacyjne tej linii do maksymalnej prędkości jazdy pociągów pasażerskich wynoszącej 160 km/h oraz jazdy pociągów towarowych wynoszącej 120 km/h.

Wykonana dokumentacja projektowa modernizacji linii kolejowej nr 132 na odcinku Opole Groszowice - Opole Zachodnie zakładała wykorzystanie konstrukcji stalowej istniejącego mostu kolejowego przez Odrę w planowanej dalszej 50-letniej eksploatacji linii, po wykonaniu ograniczonych prac modernizacyjnych, związanych głównie z naprawą i/lub wzmocnieniem elementów pomostu.

Opis konstrukcji i stanu technicznego przęsła mostu

Most kolejowy przez Odrę w Opolu został oddany do eksploatacji w latach dwudziestych XX wieku, a więc jego konstrukcja liczy już blisko 100 lat [13]. Konstrukcja stalowa przęsła mostu jest czteroprzęsłową, dwudźwigarową konstrukcją kratownicową o schemacie statycznym belki ciągłej z przegubami Gerbera, posiadającą pomost otwarty w postaci rusztu podłużnicowo – poprzecznikowego z blachownic nitowanych i belek walcowanych (rys. 1). Wszystkie połączenia w konstrukcji stalowej są nitowane. Główne parametry geometryczne mostu są następujące: rozpiętości teoretyczne przęsła (w osiach podpór) 37,00 + 44,40 + 59,20 + 37,00 m, rozstaw dźwigarów głównych (w osiach dźwigarów) 8,50 m.

Najbardziej uszkodzonymi elementami konstrukcji stalowej przęsła mostu są połączenia podłużnic i po-



3. Typowe uszkodzenia połączeń podłużnic i poprzecznic: (a) pęknięta nakładka uciągająca pas górny podłużnicy; (b) intensywna korozja wżerowa pasów górnych podłużnic wraz z nakładkami uciągającymi.

poprzecznic w obrębie pomostu (rys. 2). W wyniku intensywnych procesów zmęczeniowych, związanych z blisko 100-letnią eksploatacją mostu, w tych połączeniach występują liczne pęknięcia zmęczeniowe, osłabiające połączenie i poszczególne elementy pomostu (rys. 3a). Konsekwencje tych pęknięć oraz ich przyspieszoną propagację potęguje korozja wżerowa i powierzchniowa, spowodowana brakiem trwałej i skutecznej ochrony antykorozyjnej stali (rys. 3b). Dodatkowym następstwem uszkodzeń połączeń w pomoście (w szczególności pęknięć nakładek ciągłości na podłużnicach) jest zmiana schematu statycznego podłużnic z belki ciągłej na swobodnie podpartą, a tym samym przeciążenie podłużnic. W strefie połączeń elementów pomostu ma także miejsce korozja naprężeniowa poprzecznic, wynikająca ze znacznego wyężenia materiału w strefie tych węzłów.

Z wyjątkiem korozji powierzchniowej stali (ubytki do 5% przekroju elementów) oraz uszkodzeń w przegubach, stan techniczny dźwigarów

kratownicowych jest zadowalający. Jednakże uszkodzenia zidentyfikowane w przegubach (pęknięcia elementów, brak niektórych śrub) świadczą o ich przeciążeniu i mogą powodować nieprawidłowe działanie przegubów (rys. 4). Ten niekorzystny stan pogarsza jeszcze korozja elementów wokół przegubów. Można z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że obecny stan przegubów powoduje ich blokowanie, co pociąga za sobą zmianę schematu statycznego konstrukcji oraz niekorzystną redystrybucję sił wewnętrznych w poszczególnych elementach kratownicy.

Przeprowadzone obliczenia sprawdzające wykazały, że przęsła mostu spełniają warunki normowe nośności doraźnej (eksploatacyjnej) przy założeniu obciążenia mostu rzeczywistym taborem kolejowym (Model D4 wg normy PN-EN 15528 [9]). Warunki te są spełnione przy uwzględnieniu rzeczywistych parametrów materiałowych konstrukcji (tj. wytrzymałości stali ustalonej na podstawie badań) oraz aktualnego stanu technicznego konstrukcji stalowej, zakładając średni 5% ubytek korozyjny przekroju poprzecznego wszystkich elementów konstrukcji oraz pęknięcia nakładek ciągłości (zmiana schematu statycznego). Najbardziej wyężonymi elementami konstrukcji stalowej pręseł są pasy dolne w strefie podporowej (58,5%), podłużnice pomostu (62,6%) oraz ich połączenia z poprzecznicami (62%). Biorąc pod uwagę uszkodzenia nakładek, nośność doraźna stoleczków, na których opierają się podłużnice pomostu, jest wykorzystana w 80%.

Procedura oceny trwałości zmęczeniowej istniejących mostów stalowych

Procedura zawiera cztery podstawowe fazy oceny trwałości zmęczeniowej istniejących mostów stalowych. Celem fazy I jest identyfikacja krytycznych elementów konstrukcji

ze względu na wyczerpanie trwałości zmęczeniowej. Faza II obejmuje szczegółowe obliczenia zmęczeniowe oraz ilościowe badania NDT tych elementów, dla których faza I wykazała niewystarczający poziom trwałości zmęczeniowej. Celem obliczeń w tej fazie jest m.in. określenie tzw. bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej, tj. przewidywanego okresu czasu do zniszczenia zmęczeniowego dla przyjętego widma obciążeń (naprężeń). Obliczenie takie wykonuje się metodą liniowej kumulacji uszkodzeń Palmgren – Minera. W przypadku możliwych poważnych konsekwencji spowodowanych wyczerpaną trwałością zmęczeniową mostu, możliwe jest podjęcie działań dodatkowych z wykorzystaniem specjalistycznych metod i narzędzi (faza III). Te metody i narzędzia to przede wszystkim: (a) metody mechaniki pęknięcia w ocenie bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej, (b) metody probabilistyczne w ocenie wpływu zmienności podstawowych parametrów na trwałość zmęczeniową, oraz (c) jakościowe badania NDT. Jeżeli wyniki działań przewidzianych w fazach od I do III nie potwierdzą możliwości pozostawienia mostu w użytkowaniu ze standardowym poziomem bieżącego utrzymania, konieczne jest wprowadzenie prac zabezpieczających i/lub naprawczych. W ramach tych prac, stanowiących fazę IV działań zalecanych wg procedury, mogą być konieczne: intensyfikacja przeglądów i/lub wprowadzenie stałego monitoringu mostu, redukcja ciężaru i liczby pojazdów poruszających się po moście, naprawa/wymiana elementów pękniętych, wzmocnienie wybranych elementów mostu, a w najgorszym razie – zamknięcie i rozbiórka mostu. Wstępną ocenę poziomu bezpieczeństwa zmęczeniowego elementów (faza I) wykonuje się za pomocą wzoru (1):

$$\mu_{fat} = \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Ff}\gamma_{Mf}\Delta\sigma_{E,2}} \quad (1)$$



4. Przegub w pasie górnym dźwigara kratownicowego: widoczne pęknięcie blachy górnej spowodowane nadmiernym przemieszczeniem/ obrotem pasa oraz korozją połączenia.

gdzie:

μ_{fat} – poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego,

$\Delta\sigma_c$ – wytrzymałość zmęczeniowa normatywna dla $N_c=2$ milionów cykli (tzw. kategoria zmęczeniowa elementu),

$\Delta\sigma_{E,2}$ – równoważny zakres zmienności naprężeń o stałej amplitudzie, odniesiony do 2 milionów cykli,

γ_{Mf} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla wytrzymałości zmęczeniowej $\Delta\sigma_c$,

γ_{Ff} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla równoważnego zakresu zmienności naprężeń o stałej amplitudzie $\Delta\sigma_{E,2}$.

Wartości poszczególnych wielkości przyjmuje się wg normy PN-EN 1993-1-9 [10]. Równoważny zakres zmienności naprężeń o stałej amplitudzie, odniesiony do 2 milionów cykli oblicza się wg wzoru (2):

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} = \lambda \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff}, Q_k) \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta\sigma(\gamma_{Ff}, Q_k)$ – zakres zmienności naprężeń od obciążeń zmęczeniowych wg normy PN-EN 1991-2 [11],

Q_k – wartość obciążeń charakterystycznych dla Modelu 71 obciążeń mostów kolejowych wg normy PN-EN 1991-2 [11],

$\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \lambda_4$ ale dla $\lambda \leq \lambda_1$ – współczynnik równoważności uszkodzeń wg normy PN-EN 1993-2 [12],

λ_1 – współczynnik wyrażający efekt uszkodzenia od ruchu, zależy od długości linii wpływu,

λ_2 – współczynnik wyrażający wpływ natężenia ruchu,

λ_3 – współczynnik wyrażający wpływ okresu użytkowania mostu,

λ_4 – współczynnik stosowany w elementach konstrukcyjnych obciążonych na więcej niż jednym torze.

Zakres zmienności naprężeń od obciążenia zmęczeniowego Modelem 71 wyznacza się jako różnicę algebraiczną maksymalnych i minimalnych naprężeń w analizowanym elemencie wg wzoru (3):

$$\Delta\sigma_p = |\Delta\sigma_{p,max} - \Delta\sigma_{p,min}| \quad (3)$$

Gdy wyznaczony wg opisanej powyższej procedury poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego $\mu_{fat} \geq 1,0$ wówczas należy przyjąć, że w elemencie (połączeniu) nie występuje zagrożenie zmęczeniem. Gdy $\mu_{fat} < 1,0$ wówczas należy przejść do fazy II procedury oceny trwałości zmęczeniowej.

Faza II oceny trwałości zmęczeniowej polega na szczegółowych obliczeniach i badaniach tych elementów, dla których faza I wykazała niewystarczający poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego (tj. $\mu_{fat} < 1,0$). Obliczenie w fazie II wykonuje się metodą liniowej kumulacji uszkodzeń Palmgren – Minera wg wzoru (4):

$$D_d = \sum \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq 1 \text{ oraz } T_s = \frac{1}{D_d} \quad (4)$$

gdzie:

D_d – sumaryczne uszkodzenie zmęczeniowe w analizowanym okresie użytkowania,

n_{Ei} – liczba cykli związana z zakresem zmienności naprężeń $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$ w i -tym paśmie obliczeniowego widma obciążeń,

N_{Ri} – trwałość obliczeniowa (jako liczba cykli) uzyskana na podstawie obliczeniowej krzywej zmęczenio-

wej,

$\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}$ – dla zakresu zmienności $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$
 T_s – bezwarunkowa żywotność zmęczeniowa wyrażona w latach.

Trwałość (żywotność zmęczeniowa), tj. przewidywana liczba cykli do zniszczenia zmęczeniowego przy amplitudzie naprężeń $\Delta\sigma_i$ wyznacza się wg wzoru (5):

$$N_{Ri} = 2 \times 10^6 \times \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i \gamma_{Ff} \gamma_{Mf}} \right)^{m_i} \quad (5)$$

Aby uzyskać wartość trwałości N_{Ri} dla każdego pasma widma obciążeń, przyłożone zakresy zmienności naprężeń mnoży się przez współczynnik obciążeniowy γ_{Ff} natomiast wartość wytrzymałości zmęczeniowej dzieli się przez współczynnik materiałowy γ_{Mf} . Trwałość zmęczeniowa elementu nie jest zagrożona, gdy sumaryczne uszkodzenie zmęczeniowe $D_d \leq 1,0$.

Wytrzymałość zmęczeniowa trwała przy amplitudzie $\Delta\sigma_D$, tj. graniczna wartość zakresu zmienności naprężeń przy stałej amplitudzie, poniżej której nie występują uszkodzenia zmęczeniowe, została przyjęta wg normy PN-EN 1993-1-9 [10] dla $N_D = 5 \times 10^6$ cykli. Jednocześnie ze względu na możliwość okazjonalnego wystąpienia wartości większych od N_D , dla liczby cykli pomiędzy 5×10^6 oraz 10^8 istnieje możliwość modyfikacji normowej krzywej zmęczeniowej dla wartości $m_2 = m_1 + 2$.

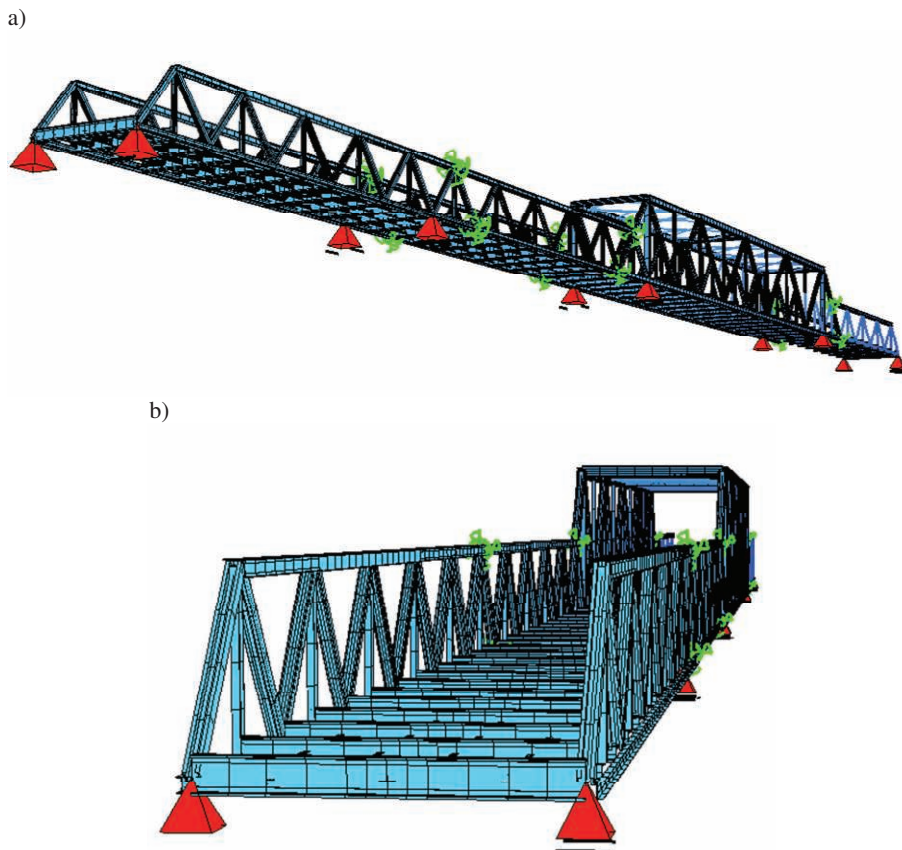
W przedstawionej procedurze wśród parametrów do obliczeń największą niepewnością są obarczone dane o widmie obciążeń w okresie eksploatacji mostu. Dlatego dane te muszą być koniecznie aktualizowane i uzupełnione.

Modele obliczeniowe konstrukcji mostu oraz obciążenia zmęczeniowego

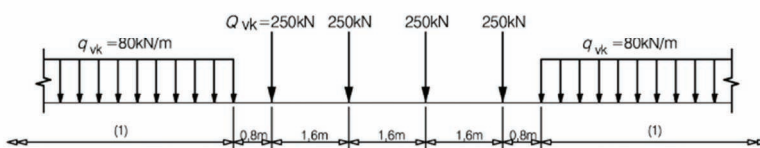
Analizę obliczeniową niezbędną do wykonania oceny trwałości zmęczenio-

niowej konstrukcji mostu wykonano metodą elementów skończonych za pomocą modeli numerycznych, wykonanych w systemie Sofistik 2014. Szczegółowa geometria konstrukcji stalowej przęseł została odwzorowana za pomocą trójwymiarowego modelu numerycznego klasy (et p3), którego wymiary ustalono na podstawie rysunków inwentaryzacyjnych. Elementy dźwigarów kratownicowych oraz pomostu zamodelowano dwuwęzłowymi elementami belkowymi typu beam, a przeguby elementami sprężynowymi typu *spring* na trzech ortogonalnych kierunkach nieprzenoszącymi momentów zginających. Zgodnie z przyjętą praktyką wszystkie nitowane połączenia węzłowe zamodelowano jako sztywne. Wszystkie elementy belkowe dyskretyzowano indywidualnie z maksymalnym rozmiarem siatki około 30 mm. Zastosowano uporządkowaną metodę siatkowania. W modelu odwzorowano podparcie konstrukcji stalowej przęseł na łożyskach przegubowo-przesuwnych oraz przegubowo-nieprzesuwnych poprzez odebranie węzłom leżącym w miejscach podpór translacyjnych stopni swobody zgodnie z rzeczywistym układem łożyskowania konstrukcji. Stal konstrukcyjną scharakteryzowano w obliczeniach jako materiał izotropowy liniowo – sprężysty o dwóch stałych inżynierskich $E = 210 \text{ GPa}$ oraz $\nu = 0,3$. Ze względu na typ konstrukcji (konstrukcja nitowana) oraz dużą ilość występujących w niej elementów dodatkowych (nitów, nakładek, blach węzłowych), ciężar własny konstrukcji stalowej przyjęto na podstawie zinwentaryzowanych przekrojów prętów brutto i powiększono o 15%. Model numeryczny konstrukcji przęseł mostu pokazano na rys. 5.

W fazie I oceny trwałości zmęczeniowej przyjęto podstawowy model kolejowych obciążeń zmęczeniowych tzw. Model 71 wg normy PN-EN 1991-2 [11] (rys. 6a). Ponieważ istniejący most ma dwa tory, obciąże-



5. Model numeryczny konstrukcji przęseł mostu.

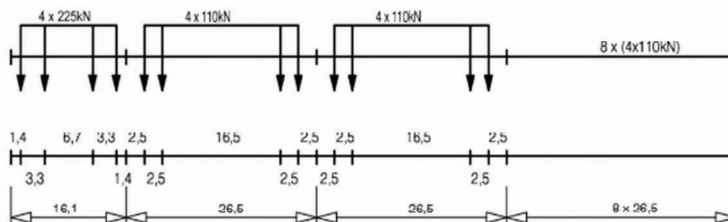


Objaśnienia

(1) Bez ograniczenia

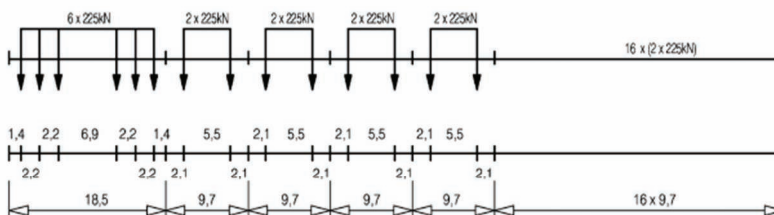
Typ 2 Lokomotywa ciągnąca pociąg pasażerski

$$\Sigma Q = 5\,300 \text{ kN} \quad V = 160 \text{ km/h} \quad L = 281,10 \text{ m} \quad q = 18,9 \text{ kN/m'}$$

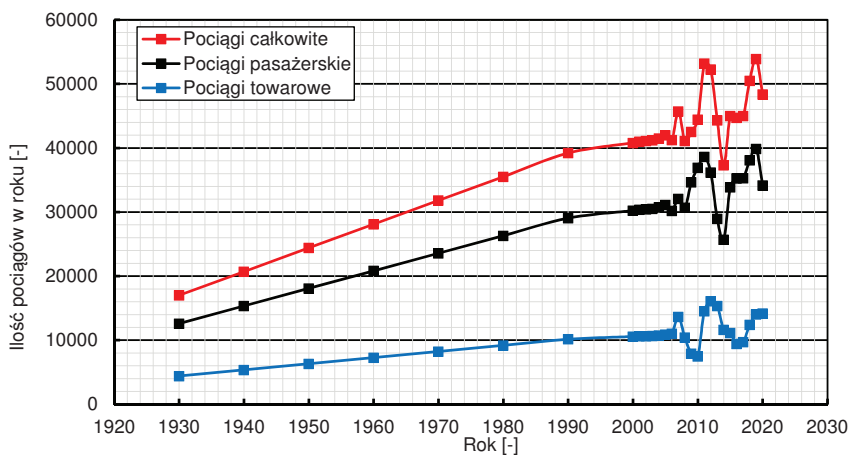


Typ 8 Lokomotywa ciągnąca pociąg towarowy

$$\Sigma Q = 10\,350 \text{ kN} \quad V = 100 \text{ km/h} \quad L = 212.50 \text{ m} \quad g = 48.7 \text{ kN/m'}$$



6. Modele obciążeń kolejowych przyjęte w ocenie trwałości zmęczeniowej mostu wg PN-EN 1991-2 [11]: a) Model 71; b) model oddziaływania zmęczeniowego typ 2 (pociąg pasażerski); c) model oddziaływania zmęczeniowego typ 8 (pociąg towarowy).



7. Widmo obciążeń rzeczywistych na moście w latach 1930 – 2020

nie ustawiano kolejno na obu torach w najbardziej niekorzystnych położeniach. Przed wykonaniem obliczeń w fazie II zostały przeprowadzone analizy i/lub pomiary oraz badania, mające na celu aktualizację i uzupełnienie informacji dotyczących obciążeń. W fazie II do symulacji eksploatacyjnych obciążeń kolejowych wykorzystano model obciążeń zmęczeniowych, zawierający kompozycję ruchu normalnego i lekkiego odpowiadające odpowiednio pociągom towarowym i pasażerskim. Zastosowano obciążenia zmęczeniowe typu 2 (lokomotywa ciągnąca pociąg pasażerski) oraz typu 8 (lokomotywa ciągnąca pociąg towarowy) wg normy PN-EN 1991-2 [11] (rys. 6b i 6c). Zastosowane obciążenia zmęczeniowe są zbliżone pod względem wartości obciążenia na oś do Modelu D4 wg normy PN-EN 15528 [10], zastosowanego do oceny nośności doraźnej mostu.

Do zbudowania widma obciążeń mostu niezbędna jest wiedza nt. kompozycji ruchu kolejowego na moście w czasie jego dotychczasowej eksploatacji. Zarządca obiektu dysponował takimi danymi jedynie za okres od 2006 r. do 2020 r. Na podstawie tych danych dokonano ekstrapolacji ruchu kolejowego (wstecz), zakładając europejski model przyrostu obciążeń kolejowych w okresie 1930 – 2006 r. wg wytycznych [8]. Na podstawie tych założeń wyznaczono analitycznie pełne widmo obciążeń kolejowych mostu z podziałem

na pociągi pasażerskie i towarowe. Udział procentowy pociągów towarowych i pasażerskich do całkowitej liczby pociągów dla okresu przed 2006 roku przyjęto jako wartość średnią z okresu pomiarowego 2006 – 2020 r. Dla okresu 1930 – 2005 r. przyjęto wartości średnie w okresach 10-letnich. Obciążenie na jednym torze przyjęto jako połowę całkowitego obciążenia na moście.

Pełne widmo obciążenia mostu taborem kolejowym w latach 1930 – 2020 przedstawiano na rys. 7. Obliczona na podstawie sporządzonego widma całkowita liczba wszystkich pociągów, które przejechały przez most w okresie jego eksploatacji w latach 1930 – 2020 wynosi $N_{obs} = 2\,904\,694$ pociągów na most oraz $N_{obs} = 1\,452\,347$ pociągów na jeden tor. W tym okresie całkowity udział pociągów towarowych wynosił 376 457, a pasażerskich 1 075 890. Wyznaczone w ten sposób liczby pociągów przyjęto do oceny trwałości zmęczeniowej mostu w fazie II.

Ocena trwałości zmęczeniowej konstrukcji mostu

Obliczone zakresy zmienności naprężeń $\Delta\sigma_p$ oraz $\Delta\sigma$ wyznaczono dla przekrojów netto tzn. z uwzględnieniem występujących otworów na nity oraz z uwzględnieniem osłabienia przekrojów ze względu na korozję. W obliczeniach naprężeń w poszczególnych elementach mostu

odpowiednie obciążenie (rys. 6) ustawiano kolejno na obu torach w najbardziej niekorzystnych położeniach na długości mostu. W obliczeniach zmęczeniowych pominięto współczynnik obciążeniowy (obciążenie charakterystyczne), lecz zastosowano współczynniki dynamiczne wg normy PN-EN 1991-2 [11].

Ocenę trwałości zmęczeniowej w fazie I wykonano z uwzględnieniem Modelu 71 obciążeń zmęczeniowych oraz wg wzoru (1) przyjmując następujące wartości:

$\Delta\sigma_c = 71$ MPa – dla połączenia / elementu nitowego wg wytycznych [8],

$\Delta\sigma_c = 160$ MPa – dla elementu kształtowników walcowanych wg normy PN-EN 1993-1-9 [10],

$\gamma_{ff} = 1,0$ – zalecane wg normy PN-EN 1993-2 [12],

$\gamma_{mf} = 1,35$ – zalecane wg normy PN-EN 1993-1-9 [10] dla dużych konsekwencji zniszczenia obiektu.

Współczynniki równoważności uszkodzeń λ_2 dla mostu wyznaczono dla natężenia ruchu kolejowego na odcinku linii 132 na podstawie danych przekazanych przez zarządcę obiektu na przełomie 14 lat, tj. od 2006 do 2020 roku. Natomiast planowany czas użytkowania mostu przyjęto 50 lat (wg założeń projektu modernizacji mostu). Pozostałe współczynniki uszkodzeń zależne od geometrii mostu przyjęto wg normy PN-EN 1993-2 [12].

Obliczenia naprężeń w elementach dźwigara głównego oraz pomostu wykonano za pomocą opisanego modelu numerycznego. Wyznaczono maksymalne i minimalne naprężenia w przekroju netto każdego z elementów oraz obliczono zakresy zmienności naprężeń $\Delta\sigma_p$. Dla elementów częściowo lub całkowicie ściskanych (pas górny w strefie przęsłowej, pas dolny w strefie podporowej oraz ściskane krzyżulce i słupki) przyjęto zredukowany zastępczy zakres zmienności naprężeń $\Delta\sigma_{e,2}$ przyjmując 60% wielkości składowej

Tab. 1. Sumaryczne uszkodzenie zmęczeniowe D_d oraz bezwarunkowa żywotność zmęczeniowa T_s krytycznych elementów pasa dolnego w konstrukcji przęsła nr 1

Element pasa dolnego	Rodzaj pociągu	$\Delta\sigma_i$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	n_i [-]	N_{Ri} [-]	n_i/N_{Ri}	D_d	T_s
D1	Typ 2: pasażerski	80,86	71,00	1075890	550272	1,955196	4,0709	0,2456
	Typ 8: towarowy	117,81	71,00	376457	177933	2,11572		
D4	Typ 2: pasażerski	64,66	71,00	1075890	1076364	0,99956	1,6193	0,6176
	Typ 8: towarowy	78,24	71,00	376457	607466	0,619717		
D6	Typ 2: pasażerski	58,41	71,00	1075890	1460088	0,736867	3,6535	0,2737
	Typ 8: towarowy	131,12	71,00	376457	129075	2,916586		

Tab. 2. Sumaryczne uszkodzenie zmęczeniowe D_d oraz bezwarunkowa żywotność zmęczeniowa T_s krytycznych krzyżulców w konstrukcji przęsła nr 3

Krzyżulce	Rodzaj pociągu:	$\Delta\sigma_i$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	n_i [-]	N_{Ri} [-]	n_i/N_{Ri}	D_d	T_s
K1	Typ 2: pasażerski	61,69	71,00	1075890	1239339	0,868116	1,4491	0,6901
	Typ 8: towarowy	76,58	71,00	376457	647914	0,581029		
K2	Typ 2: pasażerski	54,07	71,00	1075890	1840949	0,584421	0,9402	1,0636
	Typ 8: towarowy	65,03	71,00	376457	1058114	0,355781		
K2	Typ 2: pasażerski	43,90	71,00	1075890	3438462	0,312899	1,1713	0,8538
	Typ 8: towarowy	87,21	71,00	376457	438576	0,858363		
K1	Typ 2: pasażerski	56,61	71,00	1075890	1603997	0,670755	1,4955	0,6687
	Typ 8: towarowy	86,06	71,00	376457	456472	0,82471		

Tab. 3. Sumaryczne uszkodzenie zmęczeniowe D_d oraz bezwarunkowa żywotność zmęczeniowa T_s krytycznych poprzecznic w konstrukcji przęsła nr 1

Poprzecznicze	Rodzaj pociągu:	$\Delta\sigma_i$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	n_i [-]	N_{Ri} [-]	n_i/N_{Ri}	D_d	T_s
P1-P13	Typ 2: pasażerski	60,67	71,00	1075890	1302674	0,825909	1,8698	0,5348
	Typ 8: towarowy	93,09	71,00	376457	360622	1,043909		

ściskającej wg normy PN-EN 1993-1-9 [10].

Dla tak przyjętych założeń oraz obliczonych zakresów naprężeń wyznaczono wszystkie elementy konstrukcji stalowej dla których $\mu_{fat} < 1,0$. Łącznie w dźwigarach kratownicowych mostu zidentyfikowano 25 elementów zagrożonych zmęczeniem, w tym 15 odcinków pasa dolnego oraz 10 krzyżulców. Łącznie dla obu dźwigarów liczby te wynoszą

odpowiednio 30 dla odcinków pasa dolnego i 20 dla krzyżulców. Natomiast w pomoście zidentyfikowano zagrożone zmęczeniem wszystkie poprzecznicze (52), podłużnicze (192) oraz ich wzajemne połączenia. Obliczenia w fazie I wykazały zatem, że znaczna część konstrukcji stalowej mostu jest zagrożona zmęczeniem. Dla elementów wskazanych w fazie I przeprowadzono ocenę poszerzoną ocenę trwałości zmęczeniowej (faza

II), wyznaczono sumaryczne uszkodzenie zmęczeniowe oraz sprawdzono bezwarunkową żywotność zmęczeniową.

Ocenę trwałości zmęczeniowej w fazie II elementów mostu, dla których faza I wykazała zagrożenie zmęczeniem wykonano z uwzględnieniem modeli obciążeń zmęczeniowych (typ 2 i typ 8) oraz krzywych wytrzymałości zmęczeniowej, określonych w normie PN-EN 1993-1-9 [10]. Wyznaczono zakresy zmienności naprężeń $\Delta\sigma_i$ od obciążeń od pociągów pasażerskich (typ 2) oraz towarowych (typ 8) dla każdego krytycznego elementu konstrukcji, wskazanego w fazie I. Wyznaczone wartości $\Delta\sigma_i$ wykorzystano w obliczeniach sumarycznych uszkodzeń zmęczeniowych D_d wg wzoru (4) dla każdego z elementów krytycznych w założonym 50-letnim okresie eksploatacji mostu.

Przykładowe sumaryczne uszkodzenie zmęczeniowe D_d oraz bezwarunkową żywotność zmęczeniową T_s krytycznych elementów konstrukcji stalowej dźwigarów i pomostu obliczone na podstawie procedury dla fazy II podano w Tabelach 1 – 3. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń zdecydowana większość badanych elementów mostu ma już wyczerpaną trwałość zmęczeniową ($D_d > 1,0$) oraz prawie zerową bezwarunkową żywotność zmęczeniową ($T_s < 1$ rok). Oznacza to, że dosłownie w każdej chwili może się rozpocząć w tych elementach proces inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych. Najbardziej zagrożone tym procesem są połączenia pomostu oraz pasy dolne dźwigarów kratownicowych. W przypadku pomostu miejscem inicjacji pęknięć są nitowane połączenia podłużnic z poprzecznicami, natomiast w przypadku pasów dolnych dźwigarów – przekroje netto w węzłach. Pozostałe elementy sprawdzane w fazie II są również zagrożone procesem zmęczenia i pęknięciami, lecz w nieco mniejszym stopniu.

Jak wykazał przegląd stanu tech-

nicznego mostu proces inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych w pomoście już się rozpoczął. Potencjalne pęknięcia węzłów w pasach dolnych dźwigarów kratowych mogą nie być jeszcze widoczne, gdyż są ukryte pod blachami węzłowymi. Jednakże w każdej chwili, po przekroczeniu długości krytycznej pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych mogą one przejść w pęknięcie kruche, prowadzące do nagłego zniszczenia elementu / dźwigara. Zagrożenie to jest szczególnie duże w przypadku blisko 100-letniej konstrukcji mostu, którego stal konstrukcyjna cechuje się bardzo niską udarnością.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Ocena nitowanej konstrukcji stalowej mostu kolejowego przez Odrę w Opolu wykazała, że trwałość zmęczeniowa konstrukcji stalowej mostu jest już praktycznie wyczerpana, a dalsza żywotność zmęczeniowa konstrukcji jest zerowa. Dotyczy to praktycznie wszystkich elementów pomostu oraz większości elementów dźwigarów kratowych, w tym głównie pasów dolnych. Oznakami potwierdzającymi wyczerpaną trwałość zmęczeniową mostu są zidentyfikowane pęknięcia zmęczeniowe elementów połączeń poprzecznic i podłużnic. Z bardzo dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że proces inicjacji pęknięć zmęczeniowych rozpoczął się również w strefach węzłowych pasów dolnych. Brak ich wizualnej identyfikacji jest spowodowany faktem, że pęknięcia te rozwijają się zazwyczaj pod blachami węzłowymi. Wyczerpana trwałość zmęczeniowa konstrukcji w połączeniu z niską udarnością stali może prowadzić do nagłych, kruchych pęknięć, zagrażających bezpieczeństwu zarówno konstrukcji mostu jak również jego użytkownikom.

Biorąc pod uwagę ww. wyniki

przeprowadzonej oceny mostu kolejowego przez Odrę w Opolu jednoznacznie wykazano, że istniejąca konstrukcja stalowa nie nadaje się do wykorzystania w planowanej modernizacji / przebudowie mostu oraz do dalszej eksploatacji w planowanym 50-letnim okresie życia technicznego konstrukcji. Dlatego zalecono przystąpienie do prac związanych z wymianą istniejącej konstrukcji stalowej na nowe przęsła. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Akesson B. Fatigue life of riveted steel bridges. CRC Press/ Balke-ma, London, 2010.
- [2] Brühwiler E. Extending the fatigue life of riveted bridges using data from long term monitoring. Advanced Steel Construction, 2015, 11, 283 - 293.
- [3] Czudek H., Pietraszek T. Trwałość stalowych konstrukcji mostowych przy obciążeniach zmiennych. WKŁ, Warszawa, 1980
- [4] Czudek H., Wysokowski A. Trwałość mostów drogowych. WKŁ, Warszawa, 2005.
- [5] National Transportation Safety Board. Collapse of I-35W Highway Bridge Minneapolis, Minnesota, August 1, 2007. Highway Accident Report NTSB/HAR-08/03. Washington, DC, USA, 2008.
- [6] Imam B., Righiniotis T. Fatigue evaluation of riveted railway bridges through global and local analysis. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66, 1411-1421.
- [7] Kuźawa M., Kamiński T., Bień J. Fatigue assessment procedure for old riveted road bridges. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18, 1259 -1274.
- [8] Kühn B., Lukić M., Nussbaumer A., Günther H.-P., Helmerich R., Herion S., Kolstein M.H., Walbridge S., Androic B., Dijkstra O., Bucak Ö. Assessment of existing steel structures: recommendations for

estimation of remaining fatigue life. Joint Research Centre. JRC Scientific and Technical Report No.43401. European Commission, Luxembourg, 2008.

- [9] PN-EN 15528:2015-12. Kolejnictwo – Klasyfikacja linii w odniesieniu do oddziaływań pomiędzy obciążeniami granicznymi pojazdów szynowych a infrastrukturą.
- [10] PN-EN 1993-1-9:2007. Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-9: Zmęczenie.
- [11] PN-EN 1991-2:2007. Oddziaływanie na konstrukcję – Część 2: Obciążenia ruchome mostów.
- [12] PN-EN 1993-2:2010. Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 2: Mosty stalowe.
- [13] Roloff M. Die Erneuerung der Eisenbahnbrücke über die Oder bei Oppeln. Die Bautechnik, 1928, 54, 771 - 793.
- [14] Siwowski T. Trwałość zmęczeniowa drogowych mostów kratownicowych o konstrukcji nitowanej. Inżynieria i Budownictwo, 2014, 8, 435 - 440.
- [15] Siwowski T. Fatigue assessment of existing riveted truss bridges: case study. Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical Sciences, 2015, 1, 125-133.
- [16] Siwowski T., Kulpa M. Ocena trwałości zmęczeniowej istniejącego mostu stalowego wg Eurokodów. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, 2014, 1, 269-285.
- [17] Wysokowski A. Trwałość mostów stalowych w funkcji zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych. IB-DiM, Studia i Materiały, Zeszyt 53. Warszawa, 2001.
- [18] Zobel H., Alkhafaji T., Wróbel M. Metoda określanie trwałości mostów drogowych. Inżynieria i Budownictwo, 2017, 11, 582 – 587.