

Tomasz SIWOWSKI¹
Maciej KULPA²

OCENA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ISTNIEJĄCEGO MOSTU STALOWEGO WEDŁUG EUROKODÓW

Zmęczenie materiału to jeden z najczęstszych powodów uszkodzeń istniejących mostów stalowych, zwłaszcza nitowanych. W związku z tym 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 pozostałej (resztkowej) przydatności eksploatacyjnej mostu. W pracy przedstawiono główne fazy europejskiej procedury oceny trwałości zmęczeniowej, która jest kompatybilna z nowymi normami europejskimi służącymi do projektowania nowych konstrukcji stalowych – Eurokodami 1 i 3. Procedura wykorzystuje metodę bezwarunkowej żywotności w konwencji naprężeń nominalnych. Analiza oparta na tej metodzie uwzględnia wszystkie czynniki, które mogą mieć wpływ na niezawodność i bezpieczeństwo istniejących mostów stalowych. Ponadto analizę podzielono na trzy poziomy oceny: wstępną, szczegółową i ekspercką. Niepodważalną zaletą tej procedury jest fakt, że stanowi ona podstawę do tworzenia przyszłych norm europejskich w zakresie oceny nośności i prognozowania trwałości mostów. W pracy przedstawiono także przykład zastosowania procedury w ocenie trwałości zmęczeniowej kratownicowego mostu drogowego w jej poszczególnych fazach. Opierając się na przedmiotowej europejskiej procedurze oceny zmęczenia i obliczeniach MES, wyznaczono oraz przeanalizowano czynniki wpływające na żywotność obiektu. Przedstawiony przykład może zostać łatwo zastosowany w ocenie dowolnego mostu stalowego.

Słowa kluczowe: zmęczenie, mosty stalowe, kratownica, trwałość, karb konstrukcyjny, wytrzymałość zmęczeniowa

1. Wprowadzenie

Problem oceny trwałości istniejących mostów znacznie się nasilił w ostatnich latach, a wiele badań światowych wskazuje, że tendencja ta będzie się stale

¹ Tomasz Siwowski, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów, tel. 17 8651019, e-mail: siwowski@prz.edu.pl

² Autor do korespondencji/corresponding author: Maciej Kulpa, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów, tel. 17 8651016, e-mail: kulpa@prz.edu.pl

utrzymywać [1]. Kryzys ekonomiczny oraz znacząco niższe środki finansowe dostępne dla sektora infrastruktury transportu zmusiły wielu zarządców mostów oraz ich operatorów do odłożenia planowanych inwestycji budowy nowych obiektów drogowych i kolejowych, i w konsekwencji do przedłużania życia technicznego istniejących konstrukcji. W związku z tym przed zarządcami mostów stoją dzisiaj dwa główne wyzwania: konieczność zapewnienia dalszej, bezpiecznej eksploatacji istniejących mostów oraz wybór efektywnych ekonomicznie metod ich utrzymania. W tym celu niezbędne są działania pozwalające inżynierom oferować publicznym klientom rzetelną ocenę bezpieczeństwa i przydatności eksploatacyjnej istniejących mostów oraz efektywne metody ich utrzymania. Dostrzegła to także Komisja Europejska, finansując duże projekty badawcze w tej dziedzinie, m.in. *Sustainable Bridges* (www.sustainable-bridges.net), *SAMCO – Structural Assessment, Monitoring and Control* (www.samco.org) czy ostatnio *Long Life Bridges* (www.longlifebridges.com).

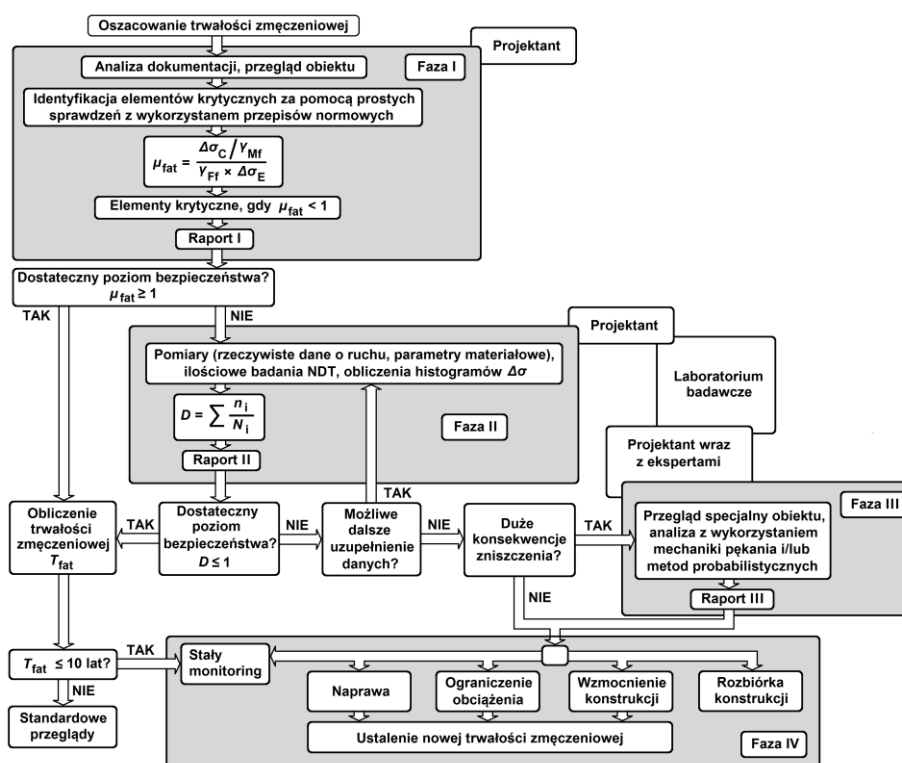
Opisaną tendencję można także zaobserwować w Polsce. Mimo że perspektywa unijna zapewni krajowi kolejny raz olbrzymie środki na budowę nowej infrastruktury drogowej i kolejowej, jednak konieczność zaangażowania budżetów krajowych w tzw. wkład własny spowoduje brak funduszy na utrzymanie istniejącej infrastruktury. Przy takich ograniczeniach finansowych rozdział środków na utrzymanie musi być oparty na rzetelnej wiedzy o stanie technicznym elementów infrastruktury i prognozowanej ich trwałości. Dlatego wdrożenie nowoczesnych metod oceny, badań i monitoringu stanu technicznego mostów oraz ich trwałości eksploatacyjnej staje się już dziś koniecznością. W Polsce wprawdzie żadna z dotychczasowych norm nie zawierała takiej procedury, jednakże od początku lat 80. ubiegłego wieku powstało wiele prac naukowych, w których zaprezentowano wiele różnych metod szacowania trwałości mostów [2-8]. 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 konstrukcji. Zalecenia te powinny opierać się na regulacjach przyjętych w eurokodach i zawierać procedury na różnym poziomie analizy: podstawowym – opartym na metodach ogólnych oraz bardziej złożonym – wymagającym specyficznego doświadczenia i wiedzy.

W przypadku istniejących mostów stalowych kluczowym zagadnieniem w aspekcie oceny i prognozowania ich trwałości eksploatacyjnej jest zmęczenie materiału. Znanych jest wiele sposobów szacowania trwałości zmęczeniowej istniejących mostów stalowych [9-11]. W niniejszej pracy przedstawiono nową procedurę, opracowaną w ramach współpracy pomiędzy Centrum Badawczym Komisji Europejskiej (JRC) oraz Europejską Konwencją Konstrukcji Stalowych (ECCS) [12]. Opisana procedura jest oparta na europejskich normach zharmonizowanych do projektowania konstrukcji – eurokodach i będzie podstawą do tworzenia przyszłych eurokodów w zakresie oceny nośności i prognozowania trwa-

łości mostów. Wykorzystując opisaną procedurę, wykonano ocenę trwałości zmęczeniowej konstrukcji stalowej mostu przez Wisłę w Sandomierzu. W pracy przedstawiono wyniki tej oceny oraz wnioski.

2. Europejska procedura oceny trwałości zmęczeniowej konstrukcji stalowych

Zalecenia europejskie [12] zawierają krokową procedurę oceny trwałości zmęczeniowej istniejących konstrukcji stalowych, w tym mostów. W zaleceniach opisano m.in. wszystkie czynniki, które należy uwzględnić w ocenie zarówno pod względem wytrzymałości materiału, jak również obciążeń i oddziaływań, oraz podano możliwości uzyskania bardziej szczegółowych informacji o tych czynnikach. Ocenę trwałości zmęczeniowej przeprowadza się, gdy most przeszedł pozytywnie (w kontekście wymagań administratora) procedurę oceny nośności doraźnej (normowej lub użytkowej). Pełną procedurę oceny trwałości zmęczeniowej zalecaną przez wytyczne [12] pokazano na rys.1.



Rys. 1. Procedura oceny trwałości zmęczeniowej istniejącej konstrukcji stalowej, na podstawie [12]

Fig. 1. The remaining fatigue life assessment procedure of existing steel structures, based on [12]

Celem **fazy I** oceny trwałości zmęczeniowej jest identyfikacja krytycznych elementów konstrukcji ze względu na wyczerpanie trwałości zmęczeniowej za pomocą możliwie najprostszej metody zalecanej przez eurokody. W tym celu należy przeprowadzić szczegółową **analizę istniejącej dokumentacji archiwalnej** (jeżeli istnieje) oraz przegląd szczegółowy mostu. Analiza dokumentacji ma na celu potwierdzenie zgodności danych archiwalnych ze stanem rzeczywistym oraz identyfikację wszelkich zmian konstrukcyjnych. Należy także zwrócić uwagę na informacje o technologii wykonania mostu oraz na dokumenty zawierające historię kolejnych działań utrzymaniowych podjętych w czasie eksploatacji mostu (naprawy, wzmocnienia, modernizacje itp.). **Przegląd szczegółowy** jest kluczowym działaniem tej fazy. Podczas przeglądu (zasadniczo w zaleceniach [12] wymaga się jedynie inspekcji wzrokowej) należy zidentyfikować wszystkie elementy mostu, które uległy częściowej degradacji. W konstrukcjach stalowych dotyczy to przede wszystkim elementów skorodowanych, pękniętych, zdeformowanych oraz uszkodzonych połączeń tych elementów – spoin lub nitów. Przed rozpoczęciem przeglądu należy szczegółowo przeanalizować dane zawarte w raportach z przeglądów z lat ubiegłych. Porównanie tych danych pozwoli na ocenę rozwoju degradacji obiektu w czasie oraz wybór tych elementów, w których proces zniszczenia przebiega najszybciej.

Wstępną ocenę trwałości zmęczeniowej należy przeprowadzić, stosując procedurę zawartą w eurokodach do oceny zmęczenia konstrukcji nowych, czyniąc w przypadku braku informacji i/lub informacji wątpliwych konserwatywne (bezpieczne) założenia. W ten sposób należy zidentyfikować elementy krytyczne ze względu na zmęczenie. Obliczenie takie jest proste i szybkie, i daje wystarczająco dobre oszacowanie poziomu bezpieczeństwa każdego elementu. Metoda jest oparta na konwencjonalnych krzywych zmęczeniowych oraz klasyfikacji karbów zawartych w Eurokodzie 3-1-9 [13] oraz na modelu obciążeń zmęczeniowych FLM3 według Eurokodu 1-2 [14]. Wstępną ocenę **poziomu bezpieczeństwa zmęczeniowego elementu** wykonuje się za pomocą wzoru:

$$\mu_{fat} = \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf} \gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}} \geq 1,0 \quad (1)$$

gdzie: μ_{fat} – poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego,
 $\Delta\sigma_C$ – wytrzymałość zmęczeniowa normatywna dla $N_C = 2$ miliony 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 $\Delta\sigma_{E,2}$.

Zasady przyjmowania wartości poszczególnych wielkości podaje Eurokod 3-1-9 [13]. Równoważny zakres zmienności naprężeń o stałej amplitudzie odniesiony do 2 milionów cykli $\Delta\sigma_{E,2}$ oblicza się ze wzoru:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \lambda_4 \times \sigma(\gamma_{Ff}, Q_k) \quad (2)$$

gdzie: $\Delta\sigma(\gamma_{Ff}, Q_k)$ – zakres zmienności naprężeń od obciążeń zmęczeniowych wg Eurokodu 1-2 [14],

λ_i – współczynniki równoważności uszkodzeń, zależne od widm obciążeń określonych w odpowiednich częściach Eurokodu 3-2 [15],

Q_k – wartość obciążeń charakterystycznych w modelu obciążeń zmęczeniowych FLM 3 według Eurokodu 1-2 [14].

Stosując najprostszy model konstrukcji, należy obliczyć siły wewnętrzne oraz maksymalne i minimalne naprężenia wynikające z obciążenia pojazdem modelu FLM3, a następnie zakresy tych naprężeń, tzn. ich różnice algebraiczne, korzystając ze wzoru:

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

Współczynniki równoważności uszkodzeń λ_i dla mostów drogowych wyznacza się według przepisów Eurokodu 3-2 [15]. W przypadku braku odpowiednich danych dotyczących λ_i wartości obliczeniowe zakresów naprężeń nominalnych można wyznaczyć, stosując zasady podane w Załączniku A Eurokodu 3-1-9 [13].

Gdy obliczony według procedury poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego elementu $\mu_{fat} \geq 1,0$, wówczas można bezpiecznie przyjąć, że w elemencie (połączeniu) nie występuje zagrożenie zmęczeniem. Gdy $\mu_{fat} < 1,0$, wówczas należy przejść do fazy II i/lub III procedury oceny trwałości zmęczeniowej według założeń [12].

Celem obliczeń w **fazie II** jest m.in. określenie tzw. **bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej**, tj. przewidywanego czasu do zniszczenia zmęczeniowego dla zadanego widma naprężeń. Obliczenie takie wykonuje się metodą liniowej kumulacji uszkodzeń Palmgrena–Minera według wzorów:

$$D_d = \sum \frac{n_{Ei}}{N_{R,i}} \leq 1,0 \quad \text{oraz} \quad T_S = \frac{1}{D_d} \quad (4)$$

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 widma obliczeniowego,

N_{Ri} – trwałość obliczeniowa (liczba cykli) uzyskana na podstawie krzywej obliczeniowej $\Delta\sigma_c/\gamma_{Mf}$ dla zakresu zmienności $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$,

T_s – bezwarunkowa żywotność zmęczeniowa wyrażona w latach.

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

Przed wykonaniem obliczeń w fazie II muszą zostać przeprowadzone analizy i/lub pomiary oraz badania mające na celu: (a) aktualizację i uzupełnienie informacji dotyczących obciążeń, (b) udoskonalenie modelu obliczeniowego konstrukcji oraz (c) uzupełnienie informacji dotyczących niektórych cech materiału. **Dane o obciążeniach** są obarczone największą niepewnością wśród wymienionych parametrów, dlatego muszą być koniecznie zaktualizowane i uzupełnione. Zamiast stosowania prostych normowych modeli obciążeń (jak np. model FLM3 według Eurokodu 1-2 [14] zastosowany w fazie I) należy zastosować rzeczywiste dane z pomiarów ruchu lub bardziej złożone modele obciążeń zmęczeniowych, uwzględniające zestawy standardowych samochodów ciężarowych, które łącznie wywołują efekty równoważne tym, jakie występują w typowym ruchu na drogach (np. model FLM4 wg Eurokodu 1-2 [14]). Należy jednak pamiętać, że wynik pomiaru w dowolnym punkcie (a także wynik obliczeń z wykorzystaniem złożonego modelu obciążeń) należy ekstrapolować zarówno w przeszłość, jak i w przyszłość. Pomocne w tym celu są wszelkie dane statystyczne z pomiarów ruchu zbierane przez administrację drogową.

Obliczeniowy model konstrukcji stosowany w fazie I jest zazwyczaj bardzo prosty, lecz konserwatywny, co powoduje, że uzyskiwane wyniki naprężeń są ogólnie od 10 do 40% większe od rzeczywistych (w zależności od jakości użytego modelu). Odnosząc to do obliczeń zmęczeniowych, można wykazać, że uzyskuje się wydłużoną żywotność zmęczeniową elementu od 1,3 do 2,7 razy, zakładając nachylenie krzywej zmęczeniowej $m = 3,0$ [12]. Z drugiej jednak strony prosty model nie uwzględnia wielu efektów drugorzędnych, z których część (np. dystorsja przekroju, deformacje z płaszczyzny, drgania) może być przyczyną pęknięć zmęczeniowych. Zastosowanie bardziej złożonego modelu obliczeniowego (np. model numeryczny 3D), walidowanego na podstawie wyników próbnego obciążenia mostu może zredukować większość niepewności związanych z zakresami naprężeń stosowanymi do obliczeń zmęczeniowych.

Wartości charakterystyczne **wytrzymałości zmęczeniowych** ustalane na podstawie normowych krzywych S-N [13] są często bardzo konserwatywne. Ponadto nie dla wszystkich możliwych elementów konstrukcyjnych występujących w istniejących mostach stalowych takie krzywe są podane w Eurokodzie [13] (np. brak danych dla połączeń/elementów nitowanych). Skutkuje to zazwy-

czaj przyjęciem niższych (bezpiecznych) kategorii zmęczeniowych w obliczeniach fazy I. Wpływ na nośność zmęczeniową detalu ma gatunek stali, z jakiej wykonano konstrukcję – nie zawsze jest on znany, szczególnie w przypadku braku dokumentacji archiwalnej. W celu uzupełnienia informacji dotyczących wytrzymałości zmęczeniowej nietypowych karbów zastosowanych w badanym moście konieczne są studia literaturowe, które będą pomocne w znalezieniu niezbędnych, wiarygodnych danych. Natomiast w celu wyznaczenia rzeczywistych cech wytrzymałościowych zastosowanej stali zazwyczaj konieczne jest przeprowadzenie badań materiałowych na próbkach wyciętych z konstrukcji. Uzupełnieniem obliczeniowej części fazy II są **ilościowe badania nieniszczące** (NDT) podejmowane w celu identyfikacji możliwych rys zmęczeniowych w elementach krytycznych wyznaczonych w fazie II. W przypadku wykrycia takich rys w konstrukcji ocenę trwałości zmęczeniowej należy wykonać według zaleceń jak dla fazy III, pomijając analizy przewidziane w fazie II.

Według zaleceń [12] w przypadku możliwych poważnych konsekwencji związanych z ryzykiem niebezpieczeństwa i/lub generowania nadmiernych kosztów, spowodowanych wykazaną w fazie II wyczerpaną trwałością zmęczeniową mostu, konieczne jest przeprowadzenie badań i analiz ujętych w **fazie III**. Faza ta obejmuje działania z wykorzystaniem specjalistycznych procedur i narzędzi, takich jak: (a) metody mechaniki pękania w ocenie bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej, (b) metody probabilistyczne w ocenie wpływu zmienności podstawowych parametrów na trwałość zmęczeniową, (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 oraz konwencjonalnym systemem przeglądów, konieczne jest wprowadzenie prac zabezpieczających i/lub naprawczych. W ramach tych prac, stanowiących **fazę IV** działań wg zaleceń [12], mogą być konieczne: intensyfikacja przeglądów i/lub wprowadzenie stałego monitoringu konstrukcyjnego (SHM), redukcja ciężaru i liczby pojazdów poruszających się po moście, naprawa elementów pękniętych, wzmocnienie mostu, a w najgorszym razie – zamknięcie i/lub rozbiórka mostu.

3. Opis mostu przez Wisłę w Sandomierzu

Most drogowy przez Wisłę w Sandomierzu położony w ciągu drogi krajowej nr 77 został wybudowany w 1953 r. Schemat statyczny mostu to kratownica ciągła o zmiennej wysokości konstrukcyjnej z jezdnią górną. Rozpiętości przęseł wynoszą odpowiednio: $84,8 + 95,4 + 95,4 + 95,4 + 84,8 = 455,8$ m. Ustrój nośny obiektu stanowią dwa nitowane dźwigary kratowe o wysokości konstrukcyjnej od 3,10 (przęsło) do 5,70 m (podpora). Dźwigary są stężone dwuteowymi poprzecznkami nitowanymi, na których opiera się stalowy ruszt pomostu z belek walcowanych, tj. dwuteowe podłużnice i poprzecznice pośrednie. Na ruszcie

są ułożone blachy nieckowe wypełnione betonem asfaltowym i przykryte konwencjonalną nawierzchnią bitumiczną. Jezdnia na obiekcie ma szerokość $2 \times 3,50$ m oraz obustronne chodniki dla pieszych o szerokości 2,1 m. Całkowita szerokość pomostu wynosi 6,45 m. Przęsła mostu są oparte na masywnych żelbetowych przyczółkach i filarach za pomocą stalowych łożysk wałkowych. Podpory mostu są posadowione na kesonach (filary) i palach drewnianych (przyczółki). Most oraz elementy jego pomostu pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Most przez Wisłę w Sandomierzu oraz elementy jego pomostu

Fig. 2. The existing bridge over the Vistula River in Sandomierz and detail of an ortotropic deck

Ogólny stan techniczny mostu oceniony na podstawie przeglądu szczegółowego jest dostateczny, co wynika głównie z wieloletnich zaniedbań utrzymaniowych. Do najpoważniejszych uszkodzeń konstrukcji stalowej dźwigarów należą ubytki korozyjne, stwierdzone głównie w węzłach pasów górnych oraz w strefach przydylatacyjnych mostu. Korozją są dotknięte również elementy rusztu pomostu oraz blachy nieckowe, szczególnie w sąsiedztwie otworów odwadniających. Podczas inspekcji mostu nie stwierdzono pęknięć elementów/połączeń ani luźnych nitów w węzłach nośnych dźwigarów. Ocena nośności doraźnej (normowej i użytkowej) mostu została wykonana według procedury opisanej w pracy [16]. Wyniki tej oceny administrator uznał za zadowalające, co było podstawą do rozpoczęcia prac nad oceną trwałości zmęczeniowej mostu.

4. Ocena trwałości zmęczeniowej mostu – faza I

Wykonana inwentaryzacja geometryczna mostu potwierdziła zgodność jego rzeczywistej konstrukcji z danymi z dokumentacji archiwalnej. Analiza istniejącej dokumentacji wykazała, że obliczenia statyczno-wytrzymałościowe konstrukcji stalowej przeprowadzono bez uwzględnienia zmęczenia materiału. Zidentyfikowane w wyniku przeglądu szczegółowego ubytki korozyjne przekro-

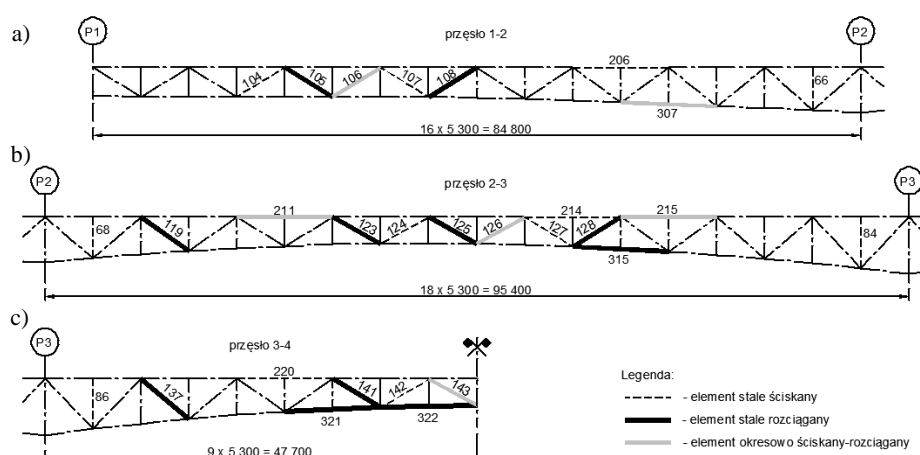
jów niektórych elementów nośnych uwzględniono w ocenie nośności normowej i użytkowej mostu.

Wstępną ocenę poziomu bezpieczeństwa zmęczeniowego elementów mostu wykonano za pomocą wzoru (1), przyjmując następujące wartości:

- $\Delta\sigma_C = 71$ MPa – dla elementu nitowanego według pracy [17],
- $\Delta\sigma_C = 80$ MPa – dla karbu spawanego w podłużnicy walcowanej według Eurokodu 3-1-9 (tab. 8.4) [13],
- $\gamma_{Ff} = 1,0$ – zalecane według Eurokodu 3-2 (r. 9) [15],
- poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego,
- $\gamma_{Mf} = 1,35$ – zalecane według Eurokodu 3-1-9 (tab. 3.1) w przypadku poważnych konsekwencji zniszczenia obiektu [13].

Współczynniki równoważności uszkodzeń λ_2 i λ_3 dla mostu wyznaczono dla następujących założeń: natężenie ruchu wg GPR 2010 (dla DK77, odcinek C), planowany czas dalszego użytkowania mostu – 10 lat (według założeń administratora). Pozostałe współczynniki uszkodzeń λ_1 i λ_4 zależą od geometrii mostu. Obliczenia sił wewnętrznych w elementach dźwigara wykonano za pomocą płaskiego modelu konstrukcji, rozdzielając obciążenie wyposażeniem i pojazdem FLM3 równomiernie na oba dźwigary oraz uwzględniając ciężar własny. Na podstawie obliczonych sił wewnętrznych wyznaczono naprężenia minimalne oraz maksymalne w przekroju netto każdego pręta oraz obliczono zakresy naprężeń $\Delta\sigma_p$.

Dla tak przyjętych założeń oraz obliczonych zakresów naprężeń wyznaczono wszystkie elementy konstrukcji stalowej, dla których $\mu_{fat} < 1,0$. Elementy te pokazano na rys. 3. (linią pogrubioną zaznaczono elementy stale rozciągane). Łącznie w konstrukcji każdego dźwigara kratowego zidentyfikowano 11 ele-



Rys. 3. Elementy dźwigara kratowego zagrożone zmęczeniem (linia pogrubiona): a) przęsło skrajne, b) przęsło przyskrajne, c) połowa przęsła środkowego

Fig. 3. The elements of the main truss vulnerable to fatigue: a) end-span, b) second span, c) half of the middle span

mentów zagrożonych zmęczeniem, w tym 3 odcinki pasa dolnego oraz 8 krzyżulec. Analogiczne obliczenia przeprowadzono dla elementów pomostu. Najbardziej zagrożonym elementem okazała się podłużnica w przekrojach usztywnionych spawanymi żebrami pionowymi, położonymi w 1/3 i 2/3 rozpiętości (rys. 2.). W tabeli 1. przedstawiono przykładowe obliczenia zmęczeniowe dla wybranych prętów dźwigara w I fazie.

Tabela 1. Przykładowe obliczenia zmęczeniowe w fazie I

Table 1. The exemplary results of calculations in phase I

Strefa dźwigara	Środkowa	Podporowa	Środkowa
Nr elementu	105 (krzyżulec)	119 (krzyżulec)	125 (krzyżulec)
A_{netto} [cm ²]	102,4	161,1	71,3
N_{min} [kN]	604,8	2410,3	1,2
N_{max} [kN]	1389,0	3242,6	850,9
$\sigma_{p,\text{min}}$ [MPa]	59,0	149,6	0,2
$\sigma_{p,\text{max}}$ [MPa]	135,6	201,3	119,4
$\Delta\sigma_p$ [MPa]	76,6	51,7	119,2
λ	0,995	1,270	0,936
Φ_2	1,0	1,0	1,0
$\Delta\sigma_{E,2}$	76,2	65,6	111,6
$\Delta\sigma_c$	71,0	71,0	71,0
γ_{Ef}	1,0	1,0	1,0
γ_{Mf}	1,35	1,35	1,35
μ_{fat}	0,69	0,80	0,47
$\mu_{fat} \geq 1,0$	0	0	0

5. Ocena trwałości zmęczeniowej mostu – faza II

Zgodnie z zaleceniami procedury [12] w fazie II wykonano aktualizację i uzupełnienie informacji dotyczących obciążeń mostu oraz zastosowano bardziej zaawansowany model obliczeniowy. Na tym etapie oceny nie przeprowadzono badań zmęczeniowych na próbkach wyciętych z konstrukcji. Przyjęto, że dane dotyczące wytrzymałości zmęczeniowej połączeń nitowanych zaczerpnięte z publikacji [17] są oparte na studiach literaturowych oraz badaniach własnych autora. Uzupełnieniem obliczeniowej części fazy II były natomiast ilościowe badania nieniszczące (NDT) wykonane w celu identyfikacji możliwych rys zmęczeniowych w elementach krytycznych, wyznaczonych w obliczeniach.

Do symulacji obciążeń mostu w fazie II wykorzystano model obciążeń zmęczeniowych FLM4 według Eurokodu 1-2 [14], przewidziany do stosowania

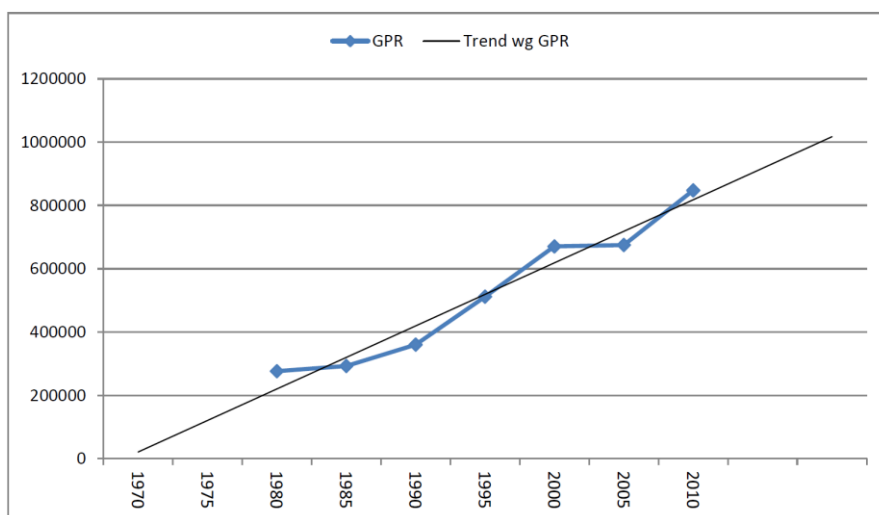
w ocenie trwałości zmęczeniowej przez odniesienie do krzywych wytrzymałości zmęczeniowej określonych w Eurokodzie 3-1-9 [13]. Jest to zestaw pięciu standardowych samochodów ciężarowych, które zastosowane łącznie wywołują efekty obciążeniowe równoważne tym, jakie mają miejsce na obiektach mostowych obciążonych typowym natężeniem ruchu na drogach europejskich. Każdy samochód jest opisany liczbą osi i ich rozstawem podłużnym i poprzecznym oraz równoważnym obciążeniem każdej osi. Model obciążenia FLM4 stosuje się przy wyznaczaniu widma zakresów naprężeń wywołanych przejazdem samochodów ciężarowych po moście. Jest on bardziej dokładny niż model FLM3 w przypadku różnych mostów i zróżnicowanego ruchu, gdy można pominąć jednoczesną obecność na moście kilku samochodów ciężarowych. Eurokod 1-2 [14] zaleca, aby w sprawdzeniach zmęczeniowych określono kategorię ruchu na moście za pomocą liczby N_{obs} samochodów ciężarowych (o maksymalnym ciężarze całkowitym większym od 100 kN), wyznaczonej pomiarami lub przewidywanej w każdym roku eksploatacji mostu. Przykładowe wartości N_{obs} z wykorzystaniem modelu FLM4, a także udział procentowy rodzajów poszczególnych pojazdów, który zależy od rodzaju ruchu, oraz parametry określające rozkład ciężaru pojazdów lub obciążeń osi każdego rodzaju podano w tablicach Eurokodu 1-2 [14]. W ocenie trwałości zmęczeniowej obiektów mostowych jest zalecane rozpatrywanie zestawu samochodów ciężarowych właściwych dla ruchu mieszanego przewidzianego na danej drodze.

Do wyznaczenia kategorii ruchu na moście w Sandomierzu (tzn. liczby N_{obs}) wykorzystano dane z Generalnego Pomiaru Ruchu na drodze krajowej nr 77 (odcinek C), zaczerpnięte ze strony GDDKiA (www.gddkia.gov.pl). Według tych pomiarów całkowita liczba pojazdów ciężkich (samochody ciężarowe, samochody ciężarowe z przyczepą oraz autobusy) wynosiła w 2010 r. $N_{obs} = 847\,530$ pojazdów. Wartość ta była podstawą do obliczenia całkowitej liczby pojazdów ciężkich, które przejechały przez most od momentu jego przekazania do eksploatacji (tj. od 1953 r.). Wielkość tą obliczono przez ekstrapolację wstecz, stosując następujące założenia:

- wielkość rzeczywistego ruchu pojazdów ciężkich w latach 2010, 2005 oraz 2000 przyjęto według GPR (www.gddkia.gov.pl),
- wielkości ruchu w latach 1980-2000 obliczono za pomocą wskaźników wzrostu ruchu na drogach krajowych, obliczonych na podstawie danych GPR i opublikowanych w pracy [6],
- wielkość ruchu w latach 1970-1980 obliczono na podstawie linii trendu wyznaczonej dla rzeczywistych pomiarów ruchu w latach 1980-2010 (rys. 4.),
- wielkość ruchu w latach 1953-1970 przyjęto jak dla 1970 r. (założenie konserwatywne).

Obliczona na podstawie wymienionych założeń oraz wyznaczonej linii trendu GPR całkowita liczba pojazdów ciężkich, które przejechały przez most w okresie jego eksploatacji w latach 1954-2010, wynosi $N_{obs} = 17\,553\,283$ po-

jazdów. Liczbę tę przyjęto w ocenie trwałości zmęczeniowej mostu, zakładając także średniodystansowy rodzaj ruchu oraz stosując strukturę podziału N_{obs} na pięć standardowych samochodów ciężarowych według Eurokodu 1-2 [14].



Rys. 4. Wzrost ruchu pojazdów ciężkich przez most w Sandomierzu w latach 1970-2010

Fig. 4. The increase in heavy traffic on the bridge in Sandomierz in the years 1970-2010

W fazie II do obliczeń sił wewnętrznych, naprężeń oraz zakresu ich zmienności $\Delta\sigma_p$ zastosowano bardziej złożony model obliczeniowy konstrukcji. Był to przestrzenny model 3D zbudowany z elementów belkowych programu Sofistik do obliczeń MES. W modelu założono sztywne węzły kratownic i pomostu oraz symulowano rzeczywiste warunki podparcia przęsła. Wykorzystując ten model, wyznaczono zakres $\Delta\sigma_p$ od obciążenia każdym z pięciu standardowych samochodów modelu FLM4 dla każdego elementu krytycznego konstrukcji wyznaczonego w fazie I. Obliczone wartości $\Delta\sigma_p$ zastosowano w obliczeniach sumarycznych uszkodzeń zmęczeniowych D_d (wg wzoru (4)) każdego z elementów krytycznych w założonym okresie eksploatacji mostu. Wyniki tych obliczeń podano w tab. 2.

Tabela 2. Sumaryczne uszkodzenie zmęczeniowe D_d krytycznych elementów mostu

Table 2. The damage accumulation calculation D_d for critical elements of the bridge

Rodzaj elementu	Krzyżulce								Pas dolny			Pomost	
	105	108	119	123	125	128	137	141	315	321	322	P_{prz}	P_{pod}
Uszkodzenie D_d	1,77	1,84	0,63	0,61	5,64	0,74	0,29	1,02	2,08	1,98	0,78	5,40	8,03

Jak wynika z tab. 2., większość badanych elementów mostu ma już wyczerpaną trwałość zmęczeniową oraz prawie zerową żywotność zmęczeniową ($D_d > 1,0$). Oznacza to, że w każdej chwili w tych elementach (jeżeli już to nie nastąpiło) może się rozpocząć proces inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych. Najbardziej zagrożone są podłużnice pomostu oraz krzyżulec 125, położony w środkowym przekroju przęsła przyskrajnego. W przypadku podłużnic miejscem inicjacji pęknięć mogą być spoiny łączące żebra pionowe z pasem dolnym belek walcowanych, natomiast w przypadku krzyżulca – przekrój netto w połączeniu nitowanym krzyżulca z blachą węzłową. Potencjalne pęknięcie zmęczeniowe krzyżulca jest bardzo niebezpieczne, gdyż będzie ukryte pod blachą węzłową, aż do momentu przekroczenia długości krytycznej i przejścia w pęknięcie kruche prowadzące do zniszczenia elementu. Ponieważ krzyżulec 125 nie jest prętem nadliczbowym, jego potencjalne zniszczenie może być groźne dla całej konstrukcji mostu.

W związku z przedstawionym wynikiem analizy obliczeniowej prace fazy II rozszerzono o ilościowe badania NDT wszystkich krytycznych elementów i połączeń o dużym zagrożeniu zmęczeniowym. Przeprowadzono szczegółowe oględziny wizualne z użyciem penetrantów (VT) oraz badania ultrasonograficzne (US) i magnetyczne (MT) spoin w wybranych podłużnicach i połączeń nitowanych prętów kratownicy oraz blach węzłowych (rys. 5.). Przeprowadzone badania NDT nie wykazały pęknięć w konstrukcji stalowej przęsła. Podjęto również wstępne badania jakościowe NDT z wykorzystaniem metody emisji akustycznej, które potwierdziły rozpoczęcie procesu inicjacji pęknięć zmęczeniowych w niektórych wskazanych lokalizacjach [18].



Rys. 5. Ilościowe badania NDT krytycznych elementów mostu

Fig. 5. The quantitative inspection (NDT methods) of critical elements

Ocena trwałości zmęczeniowej mostu kratowniczowego przez Wisłę w Sandomierzu wykonana według procedury zalecanej w pracy [12] wykazała, że wiele elementów mostu ma wyczerpaną trwałość oraz prawie zerową żywotność

zmęczeniuową. Potencjalne pęknięcia zmęczeniowe mogą doprowadzić do konieczności wprowadzenia ograniczeń w przejezdności mostu, natomiast pęknięcia krzyżulców mogą stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa całego mostu i jego użytkowników. Wprawdzie ilościowe badania NDT nie wykazały pęknięć w konstrukcji stalowej przęsła, to jednak badania AE potwierdziły rozpoczęcie tego procesu. Należy jednak zaznaczyć, że ze względu na dostępność do konstrukcji badaniami objęto jedynie 25% krytycznych węzłów dźwigarów oraz około 15% zagrożonych zmęczeniem podłużnic pomostu.

6. Kolejne fazy oceny trwałości

Wyniki oceny uzyskane w fazie II są obarczone pewnym błędem, którego przyczyny leżą zarówno po stronie bezpiecznej, jak również po stronie niebezpiecznej dla konstrukcji.

1. Przyjęty do tworzenia widma naprężeń w elementach mostu model obciążeń zmęczeniowych FLM4 oraz struktura ruchu według Eurokodu 1-2 [14] niedokładnie odzwierciedlają rzeczywistą sytuację ruchu pojazdów ciężkich na moście.
2. Przyjęta metoda obliczenia całkowitej liczby pojazdów ciężarowych w okresie dotychczasowej eksploatacji mostu (N_{obs}) oparta na danych GPR jest obciążona błędem wynikającym z przyjęcia średniej linii trendu wzrostu liczby pojazdów na moście.
3. Zastosowany model obliczeniowy MES konstrukcji mostu nie został walidowany w badaniach.
4. W obliczeniach MES nie uwzględniono rzeczywistego stanu technicznego konstrukcji, w tym zwłaszcza korozji węzłów i elementów pomostu.
5. Przyjęta metoda klasyfikacyjna oceny zmęczeniowej oparta na normowych krzywych zmęczeniowych jest stosunkowo prosta, lecz ma wiele ograniczeń.
6. Przyjęta według pracy [18] kategoria zmęczeniowa $\Delta\sigma_c$ dla połączeń nitowanych różni się od wyników badań takich połączeń, publikowanych w innych źródłach (np. w pracy [19] zaleca się przyjmowanie wartości $\Delta\sigma_c = 63$ MPa).
7. Przeprowadzone badania NDT nie obejmowały całej konstrukcji stalowej mostu.
8. Deterministyczny charakter analizy nie pozwala na uwzględnienie zmienności parametrów wpływających na trwałość mostu oraz na oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia awarii i/lub katastrofy mostu.

Prace mające na celu zmniejszenie błędu oszacowania trwałości zmęczeniowej przez likwidację części wymienionych przyczyn są przedmiotem III fazy oceny trwałości zmęczeniowej według zaleceń [12]. W ramach tej fazy należy podjąć następujące działania:

- 1) przeprowadzić badania mostu pod próbnym obciążeniem w celu walidacji modelu MES konstrukcji mostu,
- 2) w obliczeniach MES uwzględnić rzeczywisty stan techniczny konstrukcji, w tym np. zasięg korozji według zaleceń podanych w pracy [6],
- 3) przeprowadzić badania eksploatacyjne mostu pod wpływem ruchu w celu wyznaczenia rzeczywistego widma naprężeń w krytycznych elementach mostu,
- 4) wyznaczyć kategorię zmęczeniową dla połączeń nitowanych na podstawie badań,
- 5) wykonać szczegółowe obliczenie trwałości zmęczeniowej metodami mechaniki pęknięcia w celu wyznaczenia potencjalnych miejsc inicjacji pęknięć, ich wielkości, szybkości propagacji oraz wymaganej częstotliwości przeglądów mostu ze względu na zagrożenie zmęczeniem wraz z wyborem adekwatnej metody kontroli,
- 6) przeprowadzić jakościowe badania NDT całej konstrukcji stalowej (np. metodą emisji akustycznej),
- 7) wyznaczyć prawdopodobieństwo wystąpienia pęknięć zmęczeniowych oraz niezawodność konstrukcji mostu uwzględniających zmienność podstawowych parametrów stosowanych do oceny trwałości zmęczeniowej.

Dopiero po wykonaniu tych prac analitycznych i badawczych należy podjąć ostateczną decyzję o wprowadzeniu adekwatnych i skutecznych działań w ramach fazy IV, prowadzących do zwiększenia trwałości zmęczeniowej oraz podniesienia poziomu bezpieczeństwa starego mostu przez Wisłę w Sandomierzu. Jednakże jego administrator podjął inną decyzję, wyłączając most z eksploatacji do czasu jego całkowitej przebudowy, tj. wymiany istniejącej konstrukcji stalowej na nową przęsła.

7. Podsumowanie

Opisana w pracy etapowa procedura oceny trwałości zmęczeniowej uwzględnia wszystkie czynniki, zarówno te z zakresu obciążeń, jak również materiałowej mogące mieć wpływ na niezawodność i bezpieczeństwo istniejących mostów stalowych. Ponadto zawiera trzy poziomy oceny: wstępny, szczegółowy i ekspercki, oferując z jednej strony rosnącą dokładność i niezawodność wyniku, z drugiej zaś zwiększające się koszty, czas wykonania oraz wymagany poziom wiedzy osób, które mogłyby taką ocenę wykonać. Procedura jest kompatybilna z nowymi normami europejskimi służącymi do projektowania nowych konstrukcji stalowych – Eurokodami 1 i 3, uwzględnia bowiem metodę stanów granicznych oraz globalny współczynnik bezpieczeństwa konstrukcji przyjmowany w tym systemie norm, a poprzez wprowadzenie do stosowania parametrów ustalanych na poziomie krajowym (tzw. NDP) umożliwia przyjęcie częściowych współczynników bezpieczeństwa ustalonych w danym kraju. Niepodważalną

zaletą tej procedury jest to, że stanowi podstawę do tworzenia przyszłych eurokodów z zakresu oceny nośności i prognozowania trwałości mostów.

Literatura

- [1] Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability: Proc. of the Sixth International IABMAS Conference, Stresa, Lake Maggiore, Italy, 8-12 July 2013, Fabio Biondini, Dan M. Frangopol (eds.). CRC Press, 2012.
- [2] Czudek H., Pietraszek T.: Trwałość stalowych konstrukcji mostowych przy obciążeniach zmiennych. WKŁ, Warszawa 1980.
- [3] Kmita J.: Wytrzymałość eksploatacyjna mostów – celowość i zarys programu badań. Prace IBDiM, nr 1/1990.
- [4] Mańko Z., Wysokowski A.: Wytrzymałość eksploatacyjna przęseł mostowych. Prace IBDiM, nr 3/1990.
- [5] Rymśa J.: Trwałość i model degradacji obiektu mostowego. Inżynieria i Budownictwo, nr 10/1995.
- [6] Wysokowski A.: Trwałość mostów stalowych w funkcji zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych. IBDiM, Studia i Materiały, z. 53, 2001.
- [7] Czudek H., Wysokowski A.: Trwałość mostów drogowych. WKŁ, Warszawa 2005.
- [8] Alkhafaji T., Wróbel M., Zobel H.: Określanie trwałości mostów drogowych. Mosty, nr 2/2007.
- [9] Moses F., Schilling C.G., Raju K.S.: Fatigue evaluation procedures for steel bridges. NCHRP Report 299, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, November 1987.
- [10] Ni Y., Ye X., Ko J.: Monitoring-based fatigue reliability assessment of steel bridges: analytical model and application. Journal of Structural Engineering, ASCE, no. 136(12), 2010.
- [11] Guo T., Frangopol D.M., Chen Y.: Fatigue reliability assessment of steel bridge details integrating weigh-in-motion data and probabilistic finite element analysis. Computers & Structures, vol. 112-113, 2012.
- [12] Kúhn B. et al.: Assessment of existing steel structures: recommendations for estimation of remaining fatigue life. JRC Scientific and Technical Report no. 43401. European Commission, Joint Research Centre, Luxembourg 2008.
- [13] PN-EN 1993-1-9:2007. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-9: Zmęczenie.
- [14] PN-EN 1991-2:2007. Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów.
- [15] PN-EN 1993-2:2007. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 2: Mosty.
- [16] Siwowski T.: Porównanie nośności normowej i użytkowej typowego przęsła mostu kratowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska, nr 51, 2009.
- [17] Akesson B.: Fatigue life of riveted Steel Bridges. CRC Press/Balkema, London 2010.
- [18] Świt G., Goszczyńska B., Trąmpczyński W., Krampikowska A.: Zastosowanie metody emisji akustycznej do oceny stanu technicznego mostu stalowego. Inżynieria i Budownictwo, nr 10/2013.

- [19] Larsson T.: Material and fatigue properties of old metal bridges. Master Thesis 2006:26. Luleå University of Technology, Luleå, Sweden 2006.

FATIGUE ASSESSMENT OF EXISTING STEEL BRIDGES ACCORDING TO EUROCODES

S u m m a r y

In case of existing steel bridges, especially riveted ones, fatigue cracks are the most often damages suffering a bridge. Therefore a fatigue assessment procedure seems to be one of the most important in durability evaluation of existing bridges. The reliable fatigue assessment can be decisive for estimated service life of a bridge. The main steps of the fatigue assessment procedure according to European recommendations based on Eurocodes have been described in the paper. This procedure is based on safe life design method coupled with nominal stress convention and takes into account all factors related to loads and materials, which affect the reliability and safety of existing steel bridges. Additionally the procedure is divided into three levels: preliminary, detailed and expert. Not insignificant is the fact that this procedure constitutes a basis for the future extension of the Eurocodes to cover the assessment of remaining fatigue life of the existing steel bridges. The procedure application for fatigue assessment of a steel truss road bridge has been also presented. On the basis of the European fatigue assessment recommendations and FEM calculations the factors determining the fatigue life of the bridge have been established and evaluated. This example can be easily used for such kind of assessment for an arbitrary existing steel bridge.

Keywords: fatigue, steel bridges, truss, durability, structural detail, fatigue strength

Przesłano do redakcji: 02.03.2014 r.

Przyjęto do druku: 02.06.2014 r.

DOI: 10.7862/rb.2014.19