MACIEJ KULPA, *kulpa@prz.edu.pl*
TOMASZ SIWOWSKI, *siwowski@prz.edu.pl*
Politechnika Rzeszowska

OCENA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KRATOWNICOWEGO MOSTU STALOWEGO PO AWARII

FATIGUE LIFE ASSESSMENT OF STEEL TRUSS BRIDGE AFTER FAILURE

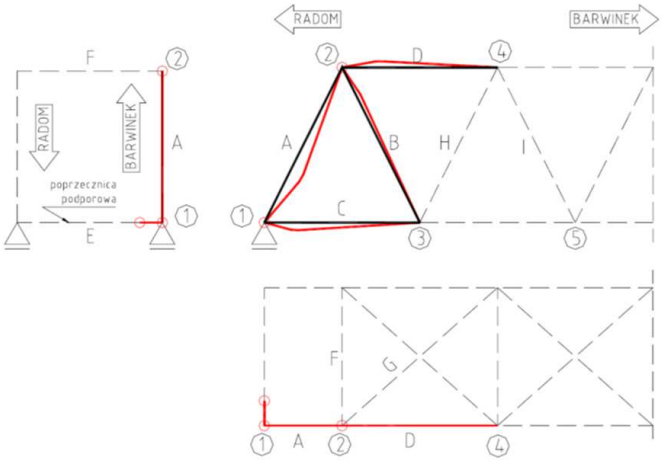
Streszczenie Konstrukcja stalowa dużego mostu kratownicowego została poważnie uszkodzona w wyniku wypadku i uderzenia ciężkiego pojazdu. Skutkiem uderzenia były deformacje plastyczne kilku prętów kratownicy oraz pęknięcia kilku połączeń nitowanych. Szczegółowa analiza pęknięć wykazała, że ich powstanie jest nie tylko wynikiem uderzenia, lecz inicjacja i rozwój niektórych pęknięć wystąpiły znacznie wcześniej. Dlatego oprócz działań związanych z doraźną naprawą kratownicy po awarii i przywróceniem pełnej przydatności eksploatacyjnej mostu, wykonano także analizę trwałości zmęczeniowej konstrukcji stalowej mostu, eksploatowanego od 1961 r. Zastosowano procedurę oceny zalecaną przez wytyczne europejskie, bazujące na założeniach Eurokodów dotyczących zmęczenia. Wyniki przeprowadzonej analizy oraz wnioski nt. trwałości zmęczeniowej mostu przedstawiono w referacie.

Abstract The steelwork of large truss bridge was seriously damaged due to heavy truck accident and hitting the structure. The plastic deformation of some truss members as well as cracking of some riveted connections were the most serious failures observed after accident. The detailed inspection of cracks revealed that the cause of cracks was not only hitting but their initiation and propagation had begun much earlier. Therefore besides immediate repair works to restore required bridge capacity and serviceability, the fatigue life assessment of the bridge, built in 1961, was carried out. The European procedure of fatigue assessment based on Eurocode provisions has been utilized. The main results of this analysis as well as conclusions on remaining fatigue life of the bridge have been presented in the paper.

1. Wprowadzenie

W dniu 31 maja 2011 roku na moście przez Wisłę w miejscowości Nagnajów w km 126+729 drogi krajowej nr 9 Radom – Barwinek miał miejsce wypadek. Kierujący samochodem ciężarowym z naczepą wypełnioną kruszywem, w wyniku prawdopodobnie pęknięcia opony, nie zapanował nad pojazdem i uderzył w prawą stronę ramy portalowej konstrukcji kratownicy, powodując poważne uszkodzenia mostu (rys. 1). Na skutek powstałych uszkodzeń most został całkowicie zamknięty dla ruchu. Po wykonaniu ekspertyzy mostu, mającej na celu ocenę uszkodzeń konstrukcji i ich wpływu na nośność i bezpieczeństwo mostu, dopuszczono ruch po moście dla pojazdów do 3,5 t. Pojazdy o większym tonażu były kierowane na objazd tymczasowy. W wyniku uderzenia pojazdu ciężarowego uszkodzeniu uległo kilka elementów konstrukcyjnych prawej kratownicy pierwszego przęsła od strony Radomia (rys. 2), w tym: krzyżulec podporowy ściskany (A), krzyżulec rozciągany (B), pas dolny rozciągany (C), pas górny ściskany (D), poprzecznica podporowa (E), węzeł nr 1, łączący pręt A z prętem C oraz poprzecznicą podporową, węzeł nr 2, łączący pręt A z prętem D oraz tężnikiem wiatrowym.

Rys. 1. Wypadek na moście w Nagnajowie będący przyczyną uszkodzeń konstrukcji stalowej kratownicy



Rys. 2. Schemat uszkodzeń kratownicy w wyniku uderzenia pojazdu

Ze względu na stopień zagrożenia dla konstrukcji szczegółowej inspekcji poddano wszystkie pęknięte elementy i połączenia. W pasie dolnym (element C) doszło do pęknięcia w przekroju netto połączenia nitowanego w obszarze węzła 1. W tym samym węźle wystąpiło także pęknięcie pasa górnego poprzecznicy podporowej (rys. 3). Dokładna obserwacja przełomów w obu pęknięciach wykazała, że na znacznej ich powierzchni widoczne były ślady zaawansowanej korozji. Może to świadczyć o znacznie wcześniejszym rozpoczęciu procesu pękania w obu przekrojach. Proces ten mogły zapoczątkować rysy zmęczeniowe, których detekcja była bardzo trudna, lub wręcz niemożliwa, podczas rutynowych przeglądów mostu. Długotrwały rozwój rys zmęczeniowych spowodował pęknięcia (osłabienie) obu elementów, których finalną fazą było kruche pęknięcie, powstałe w wyniku uderzenia pojazdem.

Wybrany w niecałe 2 tygodnie po awarii wykonawca w ramach podpisanej umowy sporządził projekt naprawy, a następnie rozpoczął prace remontowe od wykonania tymczasowej podpory w celu zabezpieczenia uszkodzonego przęsła. Po podniesieniu konstrukcji przęsła i oparciu jej na przygotowanych podporach tymczasowych, rozpoczęła się wymiana uszkodzonych elementów kratownicy. Roboty zakończono w połowie sierpnia wykonaniem badań, potwierdzających przywrócenie konstrukcji wymaganej nośności. Oprócz działań związanych z doraźną naprawą kratownicy po awarii i przywróceniem pełnej przydatności eksploatacyjnej mostu, wykonano także analizę trwałości zmęczeniowej konstrukcji stalowej mostu. Zastosowano procedurę oceny zalecaną przez wytyczne europejskie, bazujące na założeniach Eurokodów dotyczących zmęczenia [1]. Wyniki przeprowadzonej analizy oraz wnioski nt. trwałości zmęczeniowej mostu przedstawiono w referacie.

Rys. 3. Pęknięcia połączeń nitowanych pasa dolnego (element C) oraz poprzecznicy podporowej (węzeł 1)

2. Założenia do oceny trwałości zmęczeniowej mostu

Most drogowy przez Wisłę w Nagnajowie został zbudowany w latach 1959÷1961 i był wówczas jednym z najnowocześniejszych mostów stalowych tego typu, będąc wyrazem postępu technicznego w budowie polskich mostów. Postęp ten wyrażał się m.in. w zastosowaniu po raz pierwszy prętów spawanych o przekroju zamkniętym w moście kratownicowym. Most ma całkowitą długość 425,8 m i składa się z ciągłej, pięcioprzęsłowej kratownicy stalowej z jazdą dołem oraz żelbetowego belkowego przęsła dojazdowego. Po 45 latach eksploatacji bez większych robót remontowych administracja drogowa zdecydowała się na kompleksową modernizację mostu w celu dostosowania jego nośności do współczesnych wymogów, stawianych obiektom mostowym w ciągu dróg krajowych. Modernizacja mostu obejmowała remont i wzmocnienie podpór, remont i wzmocnienie stalowych przęseł kratowych, przebudowę pomostu oraz całkowitą wymianę żelbetowego przęsła dojazdowego. Ze względu na bardzo szeroki zakres robót modernizacyjnych most w Nagnajowie stał się poligonem dla wielu współczesnych technologii, stosowanych w utrzymaniu mostów stalowych [2].

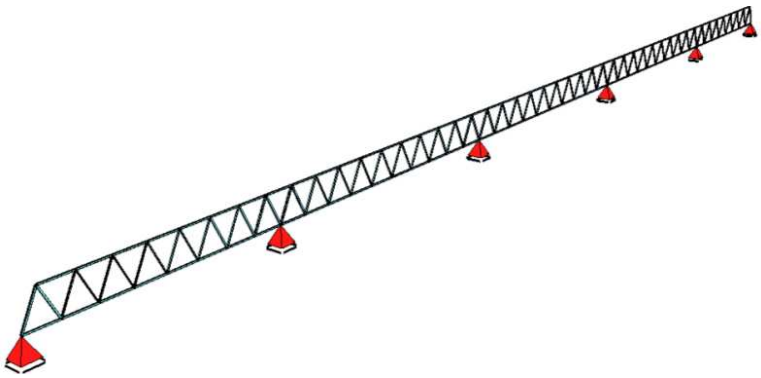
Ze względu na wykonaną w 2007 r. modernizację mostu główny nacisk w analizie zmęczeniowej został położony na te elementy i połączenia mostu, które w wyniku modernizacji nie zostały zmienione (wymienione lub wzmocnione), a więc są poddane obciążeniom eksploatacyjnym już ponad 50 lat. Do tych elementów należy większość połączeń w głównych węzłach mostu, w tym połączenia nitowane krzyżulców w węzłach pasów obu kratownic oraz niektóre połączenia nitowane i spawane belek pomostu. W szczególności ocenę wykonano dla elementów i połączeń, w których stwierdzono pęknięcia podczas awarii, spowodowanej uderzeniem pojazdu (rys. 3).

Ocenę trwałości zmęczeniowej mostu w Nagnajowie przeprowadzono w oparciu o nową procedurę, opracowaną we współpracy pomiędzy centrum badawczym Komisji Europejskiej (JRC) oraz Europejską Konwencją Konstrukcji Stalowych (ECCS) [1]. Procedura zawiera cztery podstawowe fazy oceny. Celem fazy I jest identyfikacja krytycznych elementów konstrukcji ze względu na wyczerpanie trwałości zmęczeniowej, przy pomocy możliwie najprostszej metody, zalecanej przez Eurokody. Faza II polega na szczegółowych obliczeniach zmęczeniowych i ilościowych badaniach NDT tych elementów, dla których faza I wykazała niewystarczający poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego. Celem obliczeń w tej fazie jest m.in. określenie tzw. bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej, tj. przewidywanego okresu czasu do zniszczenia zmęczeniowego dla zadanego widma naprężeń. Obliczenie takie wykonuje się metodą liniowej kumulacji uszkodzeń Palmgrena – Minera [3]. 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 podjęcie działań z wykorzystaniem specjalistycznych narzędzi (faza III). Narzędzia te to przede wszystkim: (a) metody mechaniki pękania 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 bieżącym utrzymaniem oraz systemem przeglądów, konieczne jest wprowadzenie prac zabezpieczających i/lub naprawczych. W ramach tych prac, stanowiących fazę IV działań zalecanych wg [1], mogą być konieczne: intensyfikacja przeglądów i/lub wprowadzenie stałego monitoringu mostu, dalsza redukcja ciężaru i liczby pojazdów poruszających się po moście, naprawa/wymiana elementów pękniętych, wzmocnienie mostu, a w najgorszym razie – zamknięcie i rozbiórka mostu. Pełną europejską procedurę oceny trwałości zmęczeniowej omówiono szczegółowo w pracy [4] w zastosowaniu do oceny innego drogowego mostu kratownicowego. W przypadku mostu w Nagnajowie wykonano dwie pierwsze fazy takiej oceny, a ich wyniki przedstawiono poniżej.

3. Pierwsza faza oceny trwałości zmęczeniowej mostu

Głównym zadaniem pierwszej fazy było wytypowanie krytycznych elementów stalowej konstrukcji mostu w kontekście jej trwałości zmęczeniowej. Ocenę przeprowadzono zarówno dla elementów dźwigara kratownicowego jak również dla belek pomostu. W przypadku analizy dźwigara zastosowano płaski model obliczeniowy e1-p2, a poszczególnym elementom prętowym nadano charakterystyki wynikające z rzeczywistych przekrojów brutto elementów. Odwzorowano pierwotną konstrukcję dźwigarów (z 1961 r.), modelując niewzmocnione przekroje prętów (rys. 4). Połączenia elementów w węzłach nitowanych założono jako sztywne, wbrew dość przestarzałym założeniom wycofanej Polskiej Normy [5].



Rys. 4. Model numeryczny dźwigara kratownicowego w fazie I

Model kratownicy obciążono charakterystycznym obciążeniem stałym oraz obciążeniem modelem zmęczeniowym FLM3 wg Eurokodu 1-2 [6]. Przyjęto założenie o równomiernym rozkładzie obciążenia na oba dźwigary kratowe. Stosując ten model konstrukcji obliczono siły wewnętrzne oraz maksymalne i minimalne naprężenia, wynikające z obciążenia pojazdem wg modelu FLM3, a następnie zakresy (różnice algebraiczne) tych naprężeń $\Delta\sigma_p$. Obliczone naprężenia były generowane przez siły normalne, rozkładane na przekrój brutto elementów (pominięto lokalne zginanie w prętach kratownicy oraz osłabienia przekrojów otworami na nity). W celu uzyskania równoważnego zakresu zmienności naprężeń o stałej amplitudzie, odniesionego do 2 milionów cykli $\Delta\sigma_{E,2}$, zakresy naprężeń $\Delta\sigma_p$ w każdym elemencie dźwigara mnożono przez współczynniki równoważności uszkodzeń λ, wyznaczane wg Eurokodu 3-2

[7] i zależne m.in. od widma obciążeń, natężenia ruchu na moście, usytuowania elementu w konstrukcji, okresu eksploatacji mostu, itp. Dla mostu w Nagnajowie wyznaczono następujące wartości współczynników równoważności uszkodzeń λ:

λ_1 = 1,75÷2,30 – dla różnych stref dźwigara kratownicowego (przęsłowa, podporowa);

λ_2 = 0,875 – wg Eurokodu 3-2 [7];

λ_3 = 0,860 – dla 50-letniego okresu eksploatacji mostu w pierwotnej formie;

λ_4 = 1,0 – zakładając osiowy przejazd modelu obciążenia FML3 po pomoście.

Otrzymane zakresy naprężeń $\Delta\sigma_{E,2}$ porównano z kategorią zmęczeniową analizowanych karbów konstrukcyjnych, zgodnie ze wzorem (1):

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

przyjmując następujące współczynniki bezpieczeństwa:

γ_{Mf} = 1,35 – zakładając duże konsekwencje zniszczenia wg Eurokodu 3-1-9 [8];

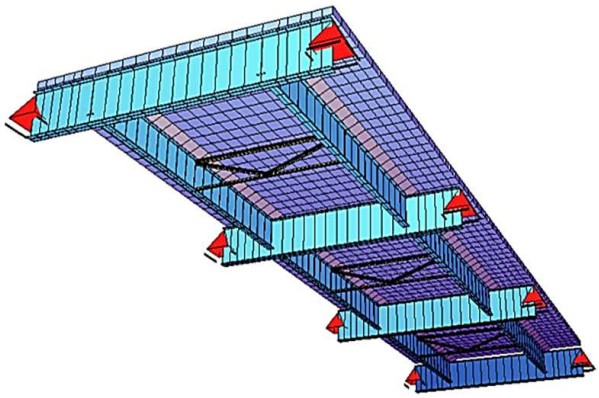
γ_{Ff} = 1,0 – zgodnie z zaleceniami Eurokodu 3-2 [7].

Ponieważ główny nacisk w tej fazie oceny położono na sprawdzenie połączeń nitowanych elementów w strefach węzłowych, przyjęto kategorię zmęczeniową takiego połączenia o wartości $\Delta\sigma_C$ = 71 MPa wg [1]. Stosując nierówność (1) sprawdzono kolejno wszystkie elementy dźwigara kratownicowego.

Dla przyjętych założeń prawie wszystkie odcinki rozciąganego pasa dolnego nie spełniają równania (1), co oznacza, że mogą mieć obniżoną trwałość zmęczeniową. Wyznaczony poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego był w zakresie μ_{fat} = 0,57÷0,98. W związku z powyższym pas dolny w całości został poddany dokładnej analizie w II fazie oceny. Podczas modernizacji mostu wzmocniono prawie wszystkie połączenia nitowane w rozciąganych odcinkach pasa górnego obu dźwigarów, wymaniając je na połączenia niejednorodne, sprężono-klejone [2]. W związku z wyeliminowaniem karbu konstrukcyjnego, jakim były połączenia nitowane rozciąganych odcinków pasów, zrezygnowano ze sprawdzenia pasa jako elementu wrażliwego na obciążenia zmęczeniowe. W wyniku analizy krzyżulców zidentyfikowano 11 elementów rozciąganych, niespełniających równania (1). Są to krzyżulce w środkach rozpiętości poszczególnych przęseł. Pięć spośród tych krzyżulców zostało wzmocnione przez sprężenie zewnętrzne podczas modernizacji mostu w 2007 r. [2]. Pozostałe sześć niewzmocnionych krzyżulców ma poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego w zakresie μ_{fat} = 0,71÷0,76. Elementy te zostały poddane szczegółowej analizie w fazie II oceny.

W celu sprawdzenia trwałości zmęczeniowej elementów pomostu wykonano uproszczony model segmentu pomostu o długości l = 27 m, równej trzykrotnemu rozstawowi poprzecznic (węzłów dźwigara). Konstrukcja pomostu jest zdylatowana w takich właśnie odstępach. Zastosowano model mieszany klasy e_1/e_2-p_3 (rys.5). Belkom rusztu nadano pierwotne charakterystyki przekrojów (przed wzmocnieniem). Model obciążono pojazdem FLM3 z obciążeniem od poszczególnych kół, rozłożonym na polu kontaktu zgodne z normą [6]. Założono przejazd pojazdu przy mimośrodowym usytuowaniu w stosunku do osi pomostu (1,75 m), co dokładniej odwzorowuje rzeczywistą sytuację eksploatacyjną.

Do oceny trwałości zmęczeniowej mostu wybrano niewzmocnione podczas modernizacji połączenia nitowane oraz połączenia spawane belek pomostu. W tych elementach (przekrojach) przeanalizowano zakresy zmienności naprężeń o stałej amplitudzie, odniesione do 2 milionów cykli $\Delta\sigma_{E,2}$ w stosunku do kategorii zmęczeniowych wg Eurokodu 3-1-9 [8]. W przypadku belek pomostu, oprócz połączeń nitowanych o kategorii zmęczeniowej $\Delta\sigma_C$ = 71 MPa, przyjęto w obliczeniach kategorię zmęczeniową połączeń spawanych o wartości $\Delta\sigma_C$ = 80 MPa.



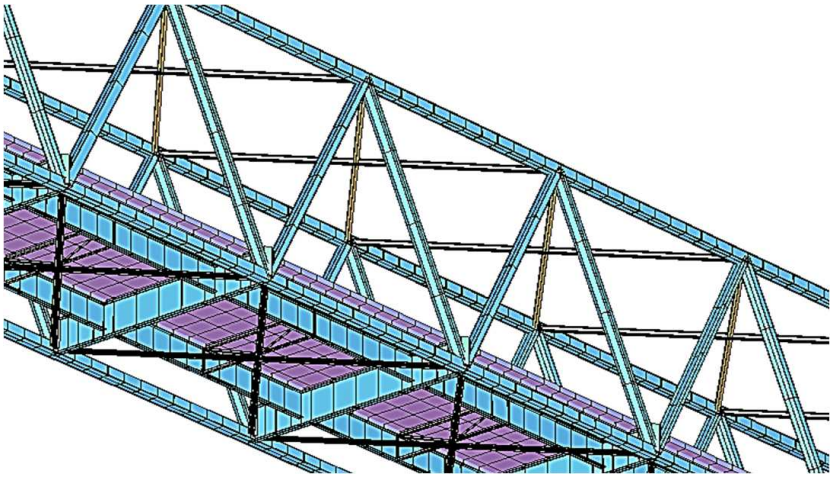
Rys. 5. Model numeryczny segmentu pomostu (przed wzmocnieniem)

Poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego dla belek pomostu jest przekroczony w dwóch karbach konstrukcyjnych: połączenie spawane pasa dolnego poprzecznicy ze stołeczkiem do podparcia podłużnicy (μ_{fat} = 0,53) oraz połączenie pasa dolnego podłużnicy z żebrem pionowym w środku rozpiętości (μ_{fat} = 0,82). Obliczenia fazy I wykazały, że podobnie jak w przypadku dźwigara kratownicowego, w przekroju poprzecznicy (połączenie nitowane), w którym stwierdzono pęknięcie w wyniku uderzenia pojazdu, nie został przekroczony poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego. Wyznaczone w wyniku obliczeń fazy I zagrożone zmęczeniem karby konstrukcyjne pomostu zostały poddane bardziej szczegółowej analizie w kolejnej fazie oceny trwałości zmęczeniowej mostu.

4. Druga faza oceny trwałości zmęczeniowej mostu

Do oceny trwałości zmęczeniowej mostu w II fazie oceny wg wytycznych [1] wykonano przestrzenny model numeryczny jego konstrukcji, w którym posłużono się zarówno elementami prętowymi e1-p3 (pręty dźwigarów kratownicowych, rusztu pomostu, zwiatrowań), jak również elementami powierzchniowymi e2-p3 (żelbetowa płyta pomostu). Wszystkim elementom nadano charakterystyki przekrojów brutto oraz odpowiednie właściwości materiałowe, uwzględniające m.in. reologię betonu pod działaniem obciążeń długotrwałych za pomocą redukcji modułu sprężystości. Modelowanie konstrukcji mostu w przestrzeni trójwymiarowej za pomocą elementów jednowymiarowych wymusiło zastosowanie elementów pomocniczych, odwzorowujących współpracę pomiędzy elementami położonymi w różnych płaszczyznach. Elementom tym nadano charakterystyki uśrednionych przekrojów współpracujących (rys. 6). Przed przystąpieniem do analizy zmęczeniowej model numeryczny zweryfikowano za pomocą wyników badań mostu pod próbnym obciążeniem, które miało miejsce przed modernizacja mostu w 2007 r.

Faza II oceny trwałości zmęczeniowej polega w szczególności na analizie tych elementów, dla których faza I wykazała niewystarczający poziom bezpieczeństwa zmęczeniowego (tj. $\mu_{fat} < 1{,}0$). Dla każdego z tych elementów wyznaczono zakresy naprężeń $\Delta\sigma_p$ od każdego z pojazdów modelu FLM4. Posłużono się tutaj procedurą wyznaczającą automatycznie ekstremalne wartości naprężeń dodatnich i ujemnych (max/min) w danym elemencie/przekroju. Jest to założenie dość konserwatywne, jednak pozwalające uwzględnić lokalne zginanie wynikające ze sztywności węzłów kratownicy. Z zakresów naprężeń $\Delta\sigma_p$ dla poszczególnych pojazdów utworzono tzw. widmo naprężeń, uwzględniając oszacowaną liczbę wszystkich pojazdów ciężkich, przejeżdżających przez most w analizowanym cyklu życia. Na podstawie wcześniejszych analiz autorów [4] wyznaczono średnią liczbę pojazdów ciężkich N_{obs} = 375 tys./rok eksploatacji mostu, przyjmując kategorię ruchu mieszanego wg PN-EN 1991-2 [6].



Rys. 6. Model numeryczny konstrukcji przęseł w fazie II (fragment)

Celem obliczeń w tej fazie było określenie tzw. bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej, tj. przewidywanego okresu czasu do zniszczenia zmęczeniowego dla zadanego widma naprężeń. Obliczenie takie wykonano metodą liniowej kumulacji uszkodzeń Palmgrena – Minera wg wzorów (2):

$$D_d = \sum \frac{n_{Ei}}{N_{R,i}} \leq 1{,}0 \quad \text{oraz} \quad T_S = \frac{1}{D_d} \tag{2}$$

gdzie:

D_d – sumaryczne uszkodzenie zmęczeniowe w analizowanym okresie użytkowania;

n_{Ei} –liczba cykli związana z obliczeniowym 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; trwałość zmęczeniowa elementu nie jest zagrożona, gdy $D_d \leq 1{,}0$.

Trwałość zmęczeniową T rozumianą jako pozostały czas bezawaryjnej eksploatacji elementu mostu obliczono odejmując od wyznaczonej bezwarunkowej żywotności TS okres 46 lat eksploatacji mostu (przed modernizacją). Wyniki tych obliczeń dla wszystkich krytycznych elementów mostu podano w tablicy 1.

Tablica 1. Bezwarunkowa żywotność zmęczeniowa T_s oraz trwałość T dla krytycznych elementów mostu

	Pas dolny		**Krzyżulce**						**Poprzecznice**			**Podłużnice**	
Nr elementu	1005	1015	5006	5007	5009	5026	5027	5046	2	18	20	7005	7022
Żywotność T_s	87	90	36	33	30	27	28	28	16	15	15	74	72
Trwałość T	41	44	Wyczerpana						Wyczerpana			28	26

Jak wynika z tablicy 1 elementami bezpiecznymi, o niezagrożonej trwałości zmęczeniowej są pasy dolne oraz podłużnice pomostu. Oznacza to teoretycznie, że stwierdzone podczas awarii pęknięcie pasa dolnego (rys. 3) nie ma charakteru zmęczeniowego. Natomiast taki charakter jest bardzo prawdopodobny w przypadku pęknięcia poprzecznicy, której oszacowana trwałość zmęczeniowa została już wyczerpana. Wprawdzie w 2007 r. wszystkie poprzecznice i ich połączenia nitowane zostały wzmocnione, co spowodowało znaczącą redukcję widma naprężeń, tym niemniej w wielu z nich mogło już wcześniej dojść do inicjacji pęknięć zmęczeniowych. Konieczna jest zatem ich bardziej szczegółowa analiza i/lub monitoring ich stanu.

Analogiczna sytuacja, o nieznacznie mniejszym poziomie wyczerpania trwałości zmęczeniowej, ma miejsce w przypadku badanych krzyżulców rozciąganych, położonych w środkowej części przęseł. W krzyżulcach niewzmocnionych istnieje realne zagrożenie wyczerpania trwałości zmęczeniowej w połączeniach nitowanych w węzłach. Wprawdzie inspekcja wizualna tych elementów przeprowadzona bezpośrednio po awarii nie wykazała obecności pęknięć, to jednak należy pamiętać, że pęknięcia w połączeniu nitowanym są zazwyczaj niewidoczne (przykryte blachą węzłową), aż do momentu przekroczenia długości krytycznej i przejścia w pęknięcie kruche. Przeprowadzona analiza wykazała, że prawdopodobieństwo wystąpienia takich pęknięć jest bardzo wysokie.

5. Podsumowanie

Analizy obliczeniowe wykonane w celu oceny trwałości zmęczeniowej mostu kratownicowego przez Wisłę w Nagnajowie wykazały, że wiele elementów mostu ma wyczerpaną trwałość zmęczeniową. Elementami tymi są głównie poprzecznice pomostu oraz wybrane krzyżulce w środkowych częściach przęseł. Potencjalne pęknięcia zmęczeniowe w poprzecznicach mogą doprowadzić do konieczności wprowadzenia ograniczeń w przejezdności mostu, natomiast pęknięcia krzyżulców mogą stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa całego mostu i jego użytkowników.

Wyniki przedstawionej oceny są obarczone pewnym błędem, którego przyczyny leżą zarówno po stronie bezpiecznej, jak również po stronie niebezpiecznej dla konstrukcji [4]. Prace mające na celu zmniejszenie błędu oszacowania trwałości zmęczeniowej przez likwidację części w/w przyczyn są przedmiotem prowadzonej obecnie III fazy oceny trwałości zmęczeniowej wg [1]. Po wykonaniu w/w prac zostaną podjęte ostateczne decyzje o wprowadzeniu adekwatnych i skutecznych działań w ramach fazy IV, prowadzących do zwiększenia trwałości zmęczeniowej oraz podniesienia poziomu bezpieczeństwa mostu w Nagnajowie. Jednakże niezależnie od wyników tych prac, ze względu na istniejące zagrożenie, inwestor zdecydował o wprowadzeniu stałego monitoringu bezpieczeństwa konstrukcji.

Literatura

1. Kühn B., i inni. 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.
2. Siwowski T., Modernizacja mostu przez Wisłę w Nagnajowie. Inżynieria i Budownictwo, nr 1-2/2009, s.104-108.
3. Czudek H., Pietraszek T. Trwałość stalowych konstrukcji mostowych przy obciążeniach zmiennych. WKŁ, Warszawa, 1980.
4. Siwowski T., Kulpa M., Zimierowicz A., Ocena trwałości zmęczeniowej mostu kratownicowego przez Wisłę w Sandomierzu. Materiały z seminarium pn.: „Trwałość obiektów mostowych”. Politechnika Wrocławska, 22-23 listopad, 2012. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, s. 239-252.
5. PN-S 10052:1982. Obiekty mostowe. Konstrukcje stalowe. Projektowanie
6. PN-EN 1991-2:2007. Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów.
7. PN-EN 1993-2:2007. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 2: Mosty.
8. PN-EN 1993-1-9:2007. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-9: Zmęczenie.