

OPTIMALIZACJA POŁOŻENIA OTWORÓW MONTAŻOWYCH W DŹWIGARACH STALOWYCH MOSTÓW NISKOWODNYCH

Artur DUCHACZEK*, Zbigniew MAŃKO**

* Wydział Zarządzania, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki
e-mail: a.duchaczek@wso.wroc.pl

** Wydział Logistyki i Transportu, Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu
e-mail: zbigniew.manko@wp.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 15.09.2013 r., Zweryfikowaną i poprawioną wersję po recenzjach i korekcie otrzymano w maju 2014 r.

© Zeszyty Naukowe WSOWL

W pracy dokonano optymalizacji lokalizacji i wielkości otworów montażowych wykonywanych w stalowych dźwigarach głównych mostów niskowodnych ze względu na ich wpływ na trwałość końcową obiektów. Analizowane zagadnienie związane było z optymalizacją konstrukcji, a dokładnie z położeniem otworów montażowych, tylko pod kątem wytrzymałościowym.

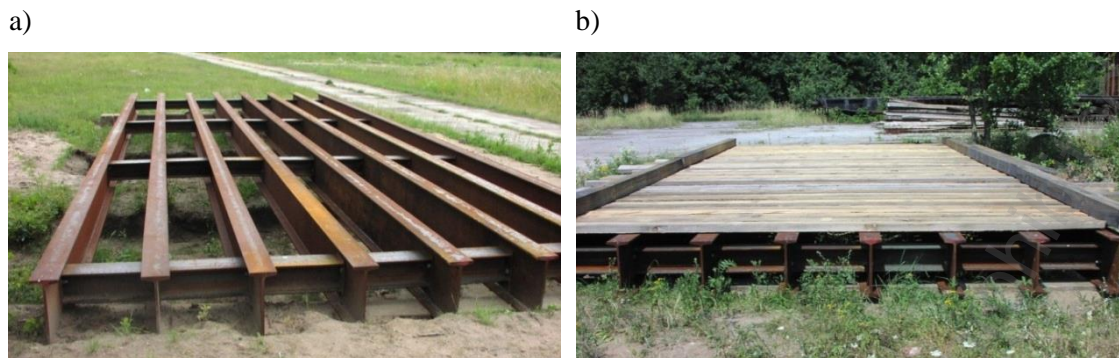
Słowa kluczowe: optymalizacja, otwór montażowy, mosty wojskowe, dźwigar stalowy, metoda elementów skończonych

WSTĘP

W podręczniku [1] wojskowe mosty niskowodne definiowane są jako konstrukcje inżynierskie budowane przeważnie z materiałów miejscowych. Z tego też względu powinny to być konstrukcje łatwe w montażu i umożliwiające wykonanie przejścia mostowego w stosunkowo krótkim czasie (rys. 1). Jednocześnie powinny one zapewniać odpowiednią nośność i wytrzymałość, a także możliwość szybkiej odbudowy częściowo zniszczonego mostu i wysoką trwałość obiektu podczas jego wieloletniej eksploatacji [1].

W skład mostu niskowodnego wchodzi konstrukcja przęsłowa (przęsło) i podpory. Przęsło składa się z dźwigarów głównych i jezdni (pomostu) oraz stężeń, umożliwiających ruch pojazdów po obiekcie. Dźwigary natomiast przyjmują obciążenia przekazywane przez jezdnię i wraz z ciężarem własnym konstrukcji przęsła przekazują je na podpory [1].

Do budowy mostów niskowodnych stosuje się drewno sosnowe i świerkowe w postaci okrągłaków, połowizn, krawędziaków, belek, bali i desek oraz stal w postaci dźwigarów walcowanych, szyn, płaskowników, trzpieni, klamer, śrub i gwoździ. Do budowy tego typu mostów używa się najczęściej stali konstrukcyjnych węglowych zwykłej jakości oraz stali niskostopowej o podwyższonej wytrzymałości [1].



Rys. 1. Konstrukcja przęsła mostu niskowodnego podczas jego budowy:
 a) układ dźwigarów głównych i stężeń poprzecznych (rozpórek),
 b) układ pomostu z dylami poprzecznymi

Źródło: [2]

W okresie, kiedy powstał podręcznik [1] zastosowanie oprogramowania komputerowego opartego na metodzie elementów skończonych (MES) nie było tak bardzo rozpowszechnione jak obecnie i dlatego też autorzy podręcznika nie mieli możliwości przeanalizowania tak dokładnie, jak można to zrobić obecnie, wszystkich zaproponowanych przez siebie rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w przęsłach mostowych.

Analizując obecnie niektóre rozwiązania konstrukcyjne, można mieć pewne wątpliwości odnośnie zasadności ich stosowania. Zdaniem autorów niniejszej pracy szczególne wątpliwości budzą rozwiązania dotyczące zastosowania do budowy mostów niskowodnych kształtowników stalowych, w których wykorzystywane są połączenia śrubowe. Wątpliwości te dotyczą przede wszystkim lokalizacji otworów montażowych zastosowanych w niektórych połączeniach, jak np. w mocowaniu płyt jezdni za pomocą trzpieni, mocowania poprzecznic ze stalowymi dźwigarami głównymi w konstrukcji przęsła, przymocowania słupków poręczowych do poprzecznic, ześrubowania pakietów złożonych z dwuteowników (rys. 2) i ceowników oraz złączy drewnianych ze śrubami [1].



Rys. 2. Ześrubowane pakiety przęsła złożone z dwuteowników stalowych

Źródło: [1]

Stalowe przęsła mostów niskowodnych powinny być projektowane według normy [3], a wówczas warunek nośności przekroju, przy obciążeniu wywołującym moment zginający M_{Ed} , przyjmuje postać (1):

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0, \quad (1)$$

gdzie $M_{c,Rd}$ to nośność obliczeniowa przekroju przy jednokierunkowym zginaniu, która dla przekrojów klasy 3, zgodnie ze wzorem (2), wynosi:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (2)$$

gdzie $W_{el,min}$ to najmniejszy sprężysty wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie (przyjmowany bezpośrednio z tabel lub norm), f_y to granica plastyczności (podawana m.in. przez producentów kształtowników), natomiast $\gamma_{M0} = 1,00$ współczynnik częściowy stosowany przy analizie nośności plastycznej przekrojów z uwzględnieniem lokalnego wyboczenia.

W strefie rozciąganej środnika występuje otwór montażowy stąd, zgodnie z normą [3], należy również sprawdzić warunek (3):

$$\frac{A_{f,net} 0,9 f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (3)$$

w którym A_f to pole przekroju całej strefy rozciąganej kształtownika bez uwzględnienia wykonanych otworów, a $A_{f,net}$ z uwzględnieniem otworów, natomiast $\gamma_{M2} = 1,25$ to współczynnik częściowy stosowany przy obliczaniu nośności przekrojów na rozciąganie.

Zatem w przypadku wymiarowania przekroju poprzecznego belki zginanej według normy [3] analizowany jest przede wszystkim przekrój poprzeczny kształtownika z wycięciem z jego środnika otworów montażowych, a nie miejsce położenia tych otworów.

Znając rozkład naprężeń normalnych w zginanym stalowym dźwigarze dwuteowym lub ceowym, należy mieć uzasadnione wątpliwości co do dowolnego rozmieszczenia otworów montażowych w środniku omawianych kształtowników, ze względu na wytrzymałość zmęczeniową. Logicznym byłoby umieszczanie ich w osi obojętnej przekroju poprzecznego elementu, jednak uwzględniając fakt, że połączenia te, w przypadku rozpórek, powinny zapewniać odpowiednią sztywność konstrukcji przęsłowej i jednocześnie włączać do współpracy przy przenoszeniu obciążeń jak największą liczbę dźwigarów głównych, rozwiązanie takie wydaje się być niewykonalne.

Celowe zatem wydaje się być przeprowadzenie optymalizacji zarówno położenia, jak i wielkości otworów montażowych stosowanych w dźwigarach głównych mostów stalowych.

1. PODSTAWY OPTIMALIZACJI KONSTRUKCJI MOSTÓW NISKOWODNYCH

Ogólnie uważa się, że optymalizacja jest obszarem wiedzy obejmującym metody wyboru racjonalizacji rozwiązań związanych z działalnością projektantów w wielu sferach inżynierskich [4]. Natomiast jak podaje M. Ostwald [5] optymalizacja konstrukcji zajmuje się zagadnieniami związanymi z wyborem parametrów kształtu i cech fizycznych szeroko rozumianych konstrukcji, przy czym kształt konstrukcji to nie tylko wy-

miary geometryczne, ale także właściwości wytrzymałościowe materiału, i dlatego też często optymalizacją konstrukcji nazywane jest określone kształtowanie wytrzymałościowe wybranych jej elementów.

Z kolei, jak podaje E. Ignasiak [6], wybór decyzji optymalnej wymaga przyjęcia określonego kryterium, według którego ocenia się decyzje jako gorsze lub lepsze. Kryterium takie zapisane jako wyrażenie matematyczne nazywane jest funkcją celu, a jej zmienne zmiennymi decyzyjnymi. Zatem rozwiązanie problemu decyzyjnego związane jest ze znalezieniem ekstremum (maksimum lub minimum) funkcji celu.

W pracy nie analizowano wpływu położenia otworów montażowych wzdłuż osi podłużnej belki, ponieważ zagadnienie to związane jest bezpośrednio z przyjętym obliczeniowym schematem statycznym układu konstrukcyjnego. W przypadku mostów niskowodnych, zgodnie z instrukcją [1], jest to zazwyczaj schemat belki swobodnie podpartej, w której największe wartości momentów zginających występują z reguły w połowie rozpiętości teoretycznej przęsła. Zatem z teoretycznego punktu widzenia to właśnie miejsce jest najbardziej narażone na występowanie ewentualnych uszkodzeń zmęczenia, które w największym stopniu uzależnione będą od występowania naprężeń normalnych wzdłuż osi podłużnej belki. Wpływ liczby stężeń poprzecznych (a w tym i położenie wykonanych otworów montażowych) autorzy zaprezentowali szczegółowo m.in. w pracy [7], a zatem ponowne omawianie tego tematu w niniejszej pracy wydaje się nieuzasadnione.

W analizowanym w pracy przypadku funkcją celu $f(X)$ jest stosunek naprężeń w obrębie otworów montażowych do naprężeń w pasie dolnym (rozciągającym) w zależności od odległości X położenia otworów montażowych od osi obojętnej przekroju poprzecznego dźwigara głównego mostu niskowodnego. Zatem w tym przypadku dziedzi-
na funkcji jest ograniczona wymiarami kształtownika stalowego, a dokładnie jego wysokością.

Analizowane w pracy zagadnienie związane jest z optymalizacją konstrukcji pod kątem wytrzymałościowym, a zatem warunkiem ograniczającym, jakie musi spełnić dopuszczalne rozwiązanie (tj. przyjęta wartość X) jest, aby naprężenia normalne (zredukowane) w obrębie otworów montażowych σ_{otw} nie przekroczyły naprężeń normalnych (zredukowanych) występujących w pasach dolnych (rozciąganych) analizowanego kształtownika σ_{max} .

W pracy sprawdzono również, czy wpływ wielkości średnicy otworów montażowych na rozkład naprężeń jest na tyle duży, że powinien być traktowany jako samodzielne kryterium optymalizacyjne.

W analizach zaprezentowanych w pracy nie uwzględniano, czy przyjęte otwory montażowe zapewniają możliwość wykonania odpowiednio wytrzymałego połączenia śrubowego, tzn., czy liczba i średnica użytych śrub będzie w stanie przenieść zakładane obciążenie użytkowe. Wynikało to m.in. z faktu, że zagadnienie to jest tematem kolejnych analiz, rozpatrywanych aktualnie przez autorów.

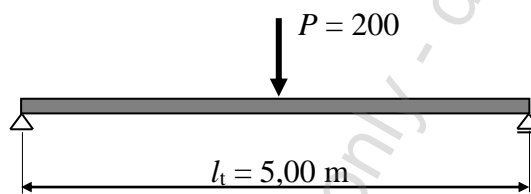
2. MODEL OBLICZENIOWY DŹWIGARA PRZYJĘTY W ANALIZACH

Do analiz numerycznych przyjęto stalowy dwuteownik zwykły IPN 400 o długości całkowitej $l_c = 5,60$ m [8], [9]. Przyjęcie dźwigara o takiej długości wynikało przede wszystkim z faktu stosowania takiej długości rzeczywistych przęseł do budowy

wojskowych mostów niskowodnych. Przyjęta długość całkowita dźwigara umożliwiała analizę przęseł mostowych o rozpiętości teoretycznej równej $l_t = 5,00$ m. Przyjęcie takiej rozpiętości teoretycznej przęsła wynikało również z możliwości wykonawczych, jakimi dysponuje polska armia w dziedzinie inżynierii wojskowej.

Zastosowanie do budowy mostów niskowodnych standardowego urządzenia do baterijnego wbijania pali (UBWP) zlokalizowanego na pontonach z parku PP-64 umożliwia bowiem budowę podpór pośrednich w rozstawach osiowych co 5,00 m. Zatem wybór do analizy poznawczej przęsła o takiej długości, z praktycznego punktu widzenia, był jak najbardziej uzasadniony. Jest oczywistym fakt, że w przypadku stosowania dwuteowników stalowych powinno się dążyć jednak do maksymalnego wydłużenia długości budowanych przęseł, tj. w granicach do 12 m.

Przy wyborze kształtownika kierowano się zarówno możliwością jego zastosowania do budowy mostów niskowodnych, jak i powszechną dostępnością materiału na rynku krajowym i lokalnym, która w tym przypadku zadecydowała przede wszystkim o wyborze tego typu kształtownika. Przyjęte dwuteowniki są obecnie szeroko dostępnym asortymentem na krajowym rynku, w przeważającej mierze występują one jednak w gatunkach stali S235, rzadziej S355.



Rys. 3. Schemat statyczny dźwigara głównego przyjęty w badaniach doświadczalnych

Źródło: Opracowanie własne

Na rysunku 3 przedstawiono schemat statyczny dźwigara głównego przyjęty w badaniach zmęczeniowych pod obciążeniem skupionym o wielkości $P = 200$ kN, umieszczonym w połowie belki.

Przyjęcie wartości maksymalnego obciążenia na poziomie $P = 200$ kN wynikało, z faktu, że autorzy pracy [10] zrealizowali badania doświadczalne takiego samego dźwigara stalowego w laboratorium badawczym Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej m.in pod takim właśnie obciążeniem i dzięki temu można było bezpośrednio wykorzystać niektóre wyniki otrzymane z tych badań eksperymentalnych do weryfikacji stworzonego modelu numerycznego.

Badany element konstrukcyjny zamodelowany został elementami powłokowymi. W procesie modelowania dźwigara wykorzystano metodę siatkowania Coons z zastosowaniem przede wszystkim elementów powierzchniowych czworokątnych 4-węzłowych oraz trójkątnych 3-węzłowych tylko w obrębie otworów. Model zawierał 3280 węzłów, przy czym na większości obszaru kształtownika przyjęto maksymalny rozmiar elementu skończonego równy 40 mm. Podczas modelowania kształtownika dokonywano także zagęszczania siatki elementów skończonych w obrębie analizowanych otworów montażowych, przyjmując liczbę węzłów na obwodzie koła (będącego konturem otworu) równą 100.

Modelując analizowany dwuteownik, dokonano niewielkiej korekty jego wymiarów, polegającej na zaokrągleniu wymiarów do pełnych milimetrów, która miała jednak niewielki wpływ na końcową wartość pola przekroju poprzecznego elementu konstrukcji A oraz jego momentu bezwładności J . Ponieważ analizowany dwuteownik stanowił jedynie reprezentację pewnej grupy kształtowników, zatem zniekształcenie wyników analiz wynikające z zastosowanej korekty nie miało znaczącego wpływu na prowadzone analizy i wnioski, a znacznie ułatwiło sam proces modelowania konstrukcji mostowej.

W wykonanych analizach wytrzymałościowych rezultaty uzyskane dla elementów powłokowych odczytywane były dla średnika z warstwy środkowej (gdyż założono brak utraty stateczności miejscowej w wyniku wyboczenia dźwigara), natomiast w przypadku naprężeń rozciągających w pasie dolnym dźwigara z warstwy dolnej (tj. najbardziej oddalonej od osi obojętnej tego dźwigara). W przypadku pasa dolnego, gdyby również odczytywać wielkości naprężeń z warstwy środkowej, to powodowałoby to zaniżanie wartości uzyskiwanych naprężeń na poziomie przekraczającym znacznie wielkość 5%. Głównym powodem takiego postępowania były wymiary badanego dwuteownika (wysokość dźwigara $h = 400$ mm i grubość pasa $t = 22$ mm).

W tabeli 1 zestawiono wyniki uzyskane z badań doświadczalnych i analiz numerycznych przy wykorzystaniu oprogramowania opartego na metodzie elementów skończonych (MES), przy czym różnicę wyników określono w [%], a jako wielkość odniesienia (100%) przyjęto wyniki otrzymane z analiz numerycznych.

Tabela 1. Zestawienie wyników uzyskanych z badań doświadczalnych i analiz numerycznych przy wykorzystaniu oprogramowania opartego na metodzie elementów skończonych (MES)

Wyszczególnienie	Naprężenia normalne wzdłuż osi podłużnej belki σ_x w [MPa] uzyskane w trakcie		Różnica wyników	
	analiz numerycznych	badań laboratoryjnych	[MPa]	[%]
Pas górny (ściskany)	222,64	186,55	-36,09	-16,21
Pas dolny (rozciągany)	164,40	171,07	+6,67	+4,06

Źródło: Opracowanie własne

Analizując dane zawarte w tabeli 1, należy stwierdzić, że stworzony model obliczeniowy w sposób zadawalający oddawał charakter pracy rzeczywistego obiektu badanego w laboratorium. Wartości naprężeń uzyskane w pasie rozciągającym dźwigara były niemal identyczne, a tak niewielka ich różnica mogła wynikać chociażby ze zmiany przekroju poprzecznego dwuteownika przyjętego do obliczeń i analiz numerycznych. Nieuwzględnienie promienia zaokrąglenia połączenia pasów ze średnikiem dźwigara powodowało niewielką zmianą pola przekroju A i momentu bezwładności J .

Dość znaczna różnica naprężeń w pasie górnym (16,21%) z dużym prawdopodobieństwem spowodowana została sposobem przekazywania obciążenia. W badaniach doświadczalnych obciążenie przekazywane było poprzez zastosowanie specjalnej płytki stalowej jako pewnego rodzaju obciążenie równomiernie rozłożone na niewielkiej powierzchni, tj. 80×155 mm. Zaś w modelu obliczeniowym dwuteownika obciążenie

zostało zamodelowane jako obciążenie liniowe równomiernie rozłożone na szerokości pasa górnego kształtownika, co powodowało wystąpienie zakłóceń w rozkładzie naprężeń w bezpośrednim sąsiedztwie przyłożonego obciążenia. W przypadku analiz numerycznych wyniki odczytywane były w węzłach znajdujących się w miejscu występowania (naklejenia) tensometrów, a zatem w strefie obejmującej obszar przedmiotowych zakłóceń w rozkładzie naprężeń w pasie górnym dwuteownika.

Biorąc jednak pod uwagę fakt, że to przede wszystkim naprężenia rozciągające będą uwzględniane w dalszych analizach zmęczeniowych dwuteownika, stwierdzono, że stworzony model obliczeniowy może być z powodzeniem użyty do dalszych analiz numerycznych rozpatrywanego dźwigara stalowego.

Następnie porównywano maksymalne naprężenia normalne i występujące w pasie dolnym (rozciągany) σ_{\max} z maksymalnymi naprężeniami normalnymi σ_x występującymi wokół otworu montażowego znajdującego się w strefie rozciąganej. Z teorii sprężystości i teorii wytrzymałości materiałów wiadomo, że otwory (w tym przypadku montażowe) zawsze są koncentratorami naprężeń, i że ten teoretyczny rozkład naprężeń normalnych zostaje w środku dwuteownika znacznie zakłócony [11], [12], [13], [14], [15].

W pierwszym etapie analiz numerycznych zdecydowano się przyjąć schemat rozmieszczenia tylko dwóch otworów montażowych w środku badanego dwuteownika wykonanych w połowie jego rozpiętości teoretycznej, pomimo że w rzeczywistych warunkach, często stosowane są również rozwiązania z jednym bądź z czterema otworami montażowymi. Stosując jednak tylko jeden otwór, montażowy, wybiera się z reguły jego lokalizację zawsze w osi obojętnej przekroju, a zatem w tym przypadku, z inżynierskiego punktu, dalsze analizy nie miałyby sensu. Wybór natomiast dwóch otworów montażowych umożliwiał pominięcie w analizach numerycznych zakłóceń w rozkładzie naprężeń powstałych od drugiej pary otworów, i dawał możliwość jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, jak daleko z otworami montażowymi można się oddalić od osi obojętnej przekroju poprzecznego elementu, aby otwory te nie były miejscem inicjacji pęknięć zmęczeniowych?

3. WYNIKI OBLICZEŃ

W tabeli 2 przedstawiono wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych, w których porównywano wartości naprężeń występujących w środku dwuteownika w obrębie otworów montażowych, w którym wykonano dwa otwory montażowe, z naprężeniami występującymi w pasie dolnym rozciągany dwuteownika niemającego otworów montażowych. Jeżeli stosunek otrzymanych naprężeń przekroczy jedność oznacza to, że ze względów wytrzymałościowych jest to bardzo niekorzystana sytuacja, ponieważ wówczas otwory te stają się bezpośrednio ewidentnymi koncentratorami naprężeń zmęczeniowych.

Przeprowadzone analizy wykazały, że we wszystkich rozważanych przypadkach rozmieszczenia otworów tylko w przypadku odległości X wynoszącej około 50 mm od osi obojętnej wielkości naprężeń w środku w obrębie otworów montażowych nie przekroczyły wartości naprężeń występujących w pasie dolnym (rozciągany) dwuteownika.

Tabela 2. Wyniki obliczeń naprężeń w [MPa] w środku dźwigara głównego w obrębie otworów montażowych o średnicy równej 16, 20, 24 i 28 mm

Średnica otworu [mm]	Odległość otworu od osi obojętnej X	Naprężenia w środku w obrębie otworów montażowych		Stosunek naprężeń w środku do naprężeń w pasie dolnym	
		normalne σ_x	zredukowane σ_{zred}	normalne σ_x	zredukowane σ_{zred}
16	40	134,31	129,90	0,817	0,790
	60	176,26	169,37	1,072	1,030
	80	211,73	206,25	1,288	1,254
	100	262,53	251,45	1,597	1,529
	120	298,13	285,87	1,813	1,738
20	40	133,08	128,90	0,809	0,784
	60	173,83	169,97	1,057	1,034
	80	211,95	205,73	1,289	1,251
	100	260,74	254,28	1,586	1,546
	120	308,49	295,85	1,876	1,799
24	40	135,88	131,97	0,827	0,802
	60	175,29	171,44	1,066	1,042
	80	225,21	215,97	1,370	1,313
	100	272,14	261,11	1,655	1,588
	120	310,98	298,22	1,892	1,813
28	40	140,19	136,74	0,853	0,831
	60	178,83	174,76	1,088	1,063
	80	228,56	220,36	1,390	1,340
	100	267,83	261,13	1,629	1,588
	120	316,82	304,88	1,927	1,854
Maksymalne naprężenia w pasie dolnym dźwigara [MPa]: a) normalne $\sigma_x = 164,40$; b) zredukowane $\sigma_{zred} = 164,46$					

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku stalowych konstrukcji mostów niskowodnych, które są przeważnie wykonywane w warunkach poligonowych, wiele do zyczenia pozostawia dość często jakość wykonania otworów montażowych. Niedokładne lub niestaranne wykonanie otworów montażowych znacznie zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia pęknięć zmęczeniowych, stąd uznano, że odległość otworów montażowych od osi obojętnej X równa 40 mm będzie odległością optymalną ze względów wytrzymałościowych, tym bardziej, że taka odległość powinna już zapewnić wykonanie stabilnego i wytrzymałego połączenia śrubowego o odpowiedniej nośności.

W tabeli 3 przedstawiono wartości naprężeń normalnych i zredukowanych występujących w obrębie otworów montażowych w środku dźwigara stalowego uzyskane z obliczeń numerycznych, które umożliwiały ocenę wpływu wielkości średnicy otworów montażowych na wielkość naprężeń w środku tego dwuteownika.

Analizując przedstawione w tabeli 3 wyniki, stwierdzono, że wraz ze wzrostem średnicy otworów montażowych rosły również naprężenia normalne w ich obrębie w środku analizowanego dwuteownika. Wydaje się jednak, że ta nieznaczna różnica naprężeń wynikała bezpośrednio z faktu, że w przypadku otworów o największej średnicy ich krawędź (na której obserwowano największe naprężenia) była położona bliżej

maksymalnych naprężeń w konstrukcji występujących na dolnej krawędzi pasa dolnego dwuteownika.

Tabela 3. Wartości naprężeń normalnych i zredukowanych w [MPa] uzyskane z obliczeń numerycznych w obrębie otworów montażowych w średniku dźwigara stalowego

Średnica otworów montażowych d [mm]	Odległość otworów od osi obojętnej [mm]				
	40	60	80	100	120
Naprężenia normalne σ_x					
16	134,31	176,26	211,73	262,530	298,13
20	133,08	173,83	211,95	260,740	308,49
24	135,88	175,29	225,21	272,140	310,98
28	140,19	178,83	228,56	267,830	316,82
Naprężenia zredukowane σ_{zred}					
16	129,90	169,37	206,25	251,45	285,87
20	128,90	169,97	205,73	254,28	295,85
24	131,97	171,44	215,97	261,11	298,22
28	136,74	174,76	220,36	261,13	304,88

Źródło: Opracowanie własne

Można zatem przyjąć, że w przypadku otworów montażowych wykonywanych na śruby stosowane w stykach w mostownictwie, wpływ wielkości ich średnic może być w przypadku mostów niskowodnych (wojskowych) pominięty. Przyjęto jednak, że w analizowanym przypadku zadawalające wyniki obliczeń uzyskano dla średnicy otworów $d = 20$ mm.

Następnie przeanalizowano wpływ rozstawu otworów na długości dźwigara na wartości naprężeń w jego średniku. W tabeli 4 przedstawiono wartości naprężeń normalnych i zredukowanych w obrębie otworów montażowych o średnicy $d = 20$ mm w średniku dwuteownika stalowego w zależności od ich rozstawu osiowego.

Tabela 4. Wartości naprężeń normalnych i zredukowanych w [MPa] w obrębie otworów montażowych o średnicy $d = 20$ mm w średniku dwuteownika stalowego w zależności od rozstawu otworów

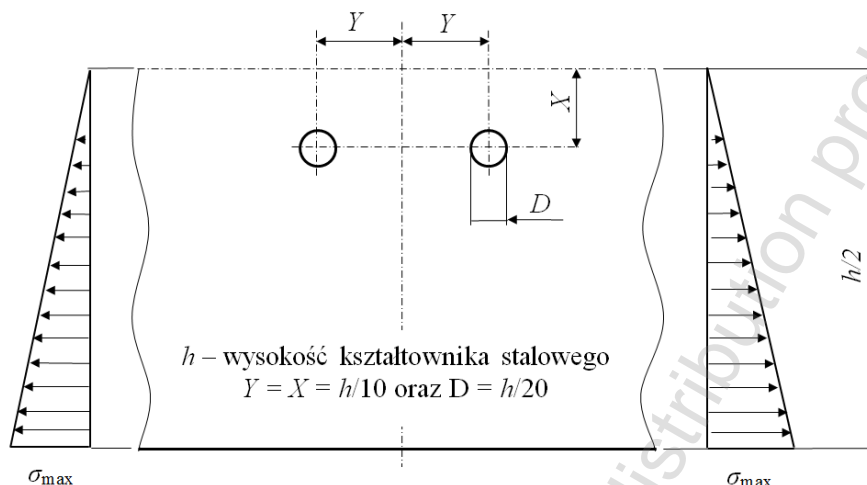
Naprężenia	Rozstaw otworów Y od osi pionowej [mm]			
	0	40	80	120
Normalne σ_x	133,08	119,12	130,76	133,28
Zredukowane σ_{zred}	128,90	118,10	126,19	130,58

Źródło: Opracowanie własne

W analizach przyjęto cztery warianty rozmieszczenia otworów montażowych. W pierwszym wariantcie przyjęto tylko jedną parę otworów montażowych, czyli rozstaw między nimi wynosił $Y = 0$. W kolejnych wariantach rozpatrywano już cztery otwory montażowe, przyjmując odpowiednio rozstaw Y między nimi 40, 80 i 120 mm.

Przeprowadzone analizy wykazały, że jedynie dla otworów umieszczonych w rozstawie $Y = 40$ mm naprężenia normalne nieznacznie różniły się od pozostałych przypadków. Biorąc jednak pod uwagę możliwości konstrukcyjne i wykonawcze przy projektowaniu tego typu poprzecznic (rozpórek), przyjęto, że optymalnym rozwiązaniem jest rozstaw Y między nimi równy 80 mm.

W wyniku przeprowadzonych analiz wytrzymałościowych zaproponowano odpowiednie rozmieszczenie otworów montażowych wykonywanych w środniku analizowanego dwuteownika, które przedstawiono na rys. 4, uogólniając je na pozostałe kształtowniki stalowe, dla których rozkład naprężeń normalnych jest zgodny z rozkładem jak w przypadku dwuteownika stalowego.



Rys. 4. Proponowane rozmieszczenie otworów montażowych wykonywanych w strefie rozciąganej środnika analizowanego dwuteownika, uogólnione na inne kształtowniki stalowe

Źródło: Opracowanie własne

Zaproponowany rozkład otworów montażowych wydaje się być wariantem optymalnym pod względem wytrzymałościowym, a jednocześnie umożliwia zaprojektowanie odpowiednio trwałego i sztywnego połączenia śrubowego (rys. 4).

Zachowanie ostrożności w ocenie położenia otworów montażowych poddyktowane jest również faktem, że otwory te służą do mocowania poprzecznicy (rozpórki), które przenoszą obciążenia z sąsiednich dźwigarów głównych. Siły występujące w tych elementach mogą powodować utratę stateczności miejscowej w wyniku wybożenia dźwigarów głównych, co nie było dotychczas uwzględniane w obliczeniach. Zjawisko to może mieć zatem również niekorzystny wpływ na rozkład naprężeń w obrębie otworów montażowych. Wpływ poprzecznicy na dźwigar główny można zamodelować jako parę sił przyłożoną do otworów montażowych, równą wartości sił rozciągających występujących w śrubach montażowych. Wówczas to wraz ze wzrostem rozstawu otworów rośnie wartość otrzymanego w ten sposób momentu zginającego. Ze względu na obszerność tematu zagadnieniu temu autorzy niniejszej pracy poświęcą jednak odrębne opracowanie.

Analizując dane przedstawione w tabeli 2 (ale również w tabelach 3 i 4), można zauważyć, że naprężenia zredukowane σ_{zred} mają mniejszą wartość niż naprężenia normalne σ_x , co w praktyce inżynierskiej jest sytuacją dość niecodzienną.

Wartość naprężeń zredukowanych w oparciu o hipotezę wyłączenia Hubera-Misesa wyznacza się z ogólnego wzoru (4) [16]:

$$\sigma_{zred} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2} + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}, \quad (4)$$

ale w przypadku elementów powłokowych przyjmuje on postać (5):

$$\sigma_{zred} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2} + 3\tau_{xy}^2}, \quad (5)$$

Analizując wzór (5) oraz wykonując proste operacje arytmetyczne, można stonkowo łatwo określić, w jakich przypadkach wartość naprężeń zredukowanych σ_{zred} będzie mniejsza od naprężeń normalnych σ_x , co można opisać nierównością (6):

$$\sigma_{zred} < \sigma_x, \quad (6)$$

wtedy gdy

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} < \sigma_x, \quad (7)$$

Stąd wynika bezpośrednio, że aby spełniona była nierówność (6), musi być spełniona nierówność (8):

$$\sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2 < 0, \quad (8)$$

a po przekształceniach wyrażenie (9):

$$\sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 < \sigma_x \sigma_y, \quad (9)$$

Wartości naprężeń normalnych σ_x i zredukowanych σ_{zred} otrzymywane były na krawędzi dolnego otworu montażowego. Dla przyjętego modelu obliczeniowego, w tym obszarze środka, występowały maksymalne wartości naprężeń normalnych σ_x , natomiast wartości naprężeń σ_y i τ_{xy} były z reguły bardzo niskie, tj. na poziomie około 3 MPa. Taki rozkład naprężeń powodował, że nierówność (9) była spełniona, stąd wartości naprężeń zredukowanych σ_{zred} obliczane według zależności (5) przyjmowały wartości mniejsze od naprężeń normalnych σ_x . Ponieważ jednak to właśnie naprężenia normalne σ_x mają największy wpływ na inicjację pęknięcia, a następnie propagację pęknięć zmęczeniowych, to ich wartość była zmienną decydującą o wyborze miejsc najbardziej wyęzonych, również w analizach wytrzymałościowych.

PODSUMOWANIE

Ze względów ekonomicznych badania doświadczalne w zakresie obciążeń zmęczeniowych na obiektach mostowych są bardzo kosztowne i czasochłonne. Z tego też względu inżynierom odpowiedzialnym za eksploatację tego typu obiektów często pozostają przede wszystkim metody numeryczne oceny wyężenia w takich konstrukcjach inżynierskich.

W pracy przeprowadzono rozważania teoretyczne dotyczące wyboru optymalnego położenia otworów montażowych w dźwigarach stalowych mostów niskowodnych uwarunkowane na wynikach obliczeń numerycznych wykonanych przy użyciu programu opartego o metodę elementów skończonych (MES). Mimo że w analizach uwzględniono tylko dwuteowniki o wysokości 400 mm, to wyprowadzone wnioski końcowe odnoszą się zarówno do dwuteowników, jak i ceowników stalowych o wysokościach w przedziale 300–500 mm, jako najczęściej stosowanych do budowy mostów tymczasowych (niskowodnych).

Wymiernym wynikiem przeprowadzonych badań będzie opracowanie nowych wytycznych służących do projektowania połączeń montażowych w stalowych przęsłach

mostów niskowodnych wykonywanych z zastosowaniem rozpórek (stężeń poprzecznych) mocowanych na śruby. Jednak, aby takie wytyczne można było przedstawić, należy dodatkowo przeprowadzić jeszcze przynajmniej obliczenia dotyczące wpływu położenia otworów montażowych na wytrzymałość zmęczeniową przęsła. Również ze względu na stosunek wartości momentów bezwładności J_x/J_z w kolejnych obliczeniach wytrzymałościowych należy uwzględnić przypadek zginania ukośnego.

Przeprowadzone w pracy analizy wykazały, że rozmieszczenie otworów montażowych według zaproponowanego schematu (rys. 4) w przypadku mostów wojskowych jest rozwiązaniem w pełni zadowalającym, a biorąc pod uwagę przyjęte kryterium wydaje się być również rozwiązaniem optymalnym. Zapewniają one bezpieczną eksploatację obiektów mostowych, nawet w przypadku wykonania otworów montażowych w warunkach poligonowych.

LITERATURA

1. Mosty wojskowe: *Podręcznik. Ministerstwo Obrony Narodowej*, Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych. Sygnatura Inż. 563/92, Warszawa 1994.
2. Mańko Z., Kamyk Z., Zielonka M., Sadowski W., *Racjonalizacja wykorzystania materiałów miejscowych do budowy mostów niskowodnych. Etap III. Badania poligonowe*. Praca Naukowo-Badawcza WIW/439, Wyższa Szkoła Oficerska im. T. Kościuszki, Wrocław 2001.
3. PN-EN- 1993-2. *Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 2: Mosty stalowe*.
4. Ostwald M.: *Podstawowe pojęcia optymalizacji*. [online]. [dostęp: 04.04.2012 r.]. Dostępne w Internecie: <http://www.sms.am.put.poznan.pl/?site=skrypty>
5. Ostwald M.: *Podstawy optymalizacji konstrukcji*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.
6. Ignasiak E.: *Badania operacyjne*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2001.
7. Mańko Z., Duchaczek A.: *Wpływ stężeń poprzecznych na wyężenie dźwigarów głównych przęsł mostów wojskowych*. [w:] „Zeszyty Naukowe Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych”, nr 4/2003, Wrocław 2003, s. 90–100.
8. PN-91/H-93407, *Stal. Dwuteowniki walcowane na gorąco*.
9. PN-EN 10024:1998, *Dwuteowniki stalowe z pochyloną wewnętrzną powierzchnią stopek walcowane na gorąco. Tolerancje kształtu i wymiarów*.
10. Duchaczek A., Mańko Z.: *Badania niskocyklowe dwuteowników stalowych wykorzystywanych do budowy mostów niskowodnych. Cz. 1*. [w:] „Zeszyty Naukowe Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych”, nr 4/2006, Wrocław 2006, s. 54–65.
11. Maximov J.T., Dunchewa G.V., Mitev I.N.: *Modelling of residual stress relaxation around cold expanded holes in carbon steel*, [in:] “Journal of Constructional Steel Research”, 2009, vol. 65, issue 4, pp. 909–917.
12. Plakhotnyi P.I., *Stress in Bars Mounted Inside an Elliptic Hole of an Elastic Plane* [in:] “Soviet Applied Mechanics”, June 1967, vol. 3, issue 6, pp. 63–65.
13. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, Edited by Totten G., Howes M., Inoue T., ASM International, The Materials Information Society, 2002.

14. Hu B., Yoshida S., Gaffney J. A., *Stress and Strain Analysis of Metal Plates with Holes*. Dynamic Behavior of Materials, vol. 1, pp. 187–193, Proceedings of the 2010 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, (June 7–10, 2010 Indianapolis, Indiana USA).
15. Maximov J.T., Kuzmanov T.V., Anchev A.P., Ichkova M.D., *A finite element simulation of the spherical mandrelling process of holes with cracks*. Journal of Materials Processing Technology, 2006, vol. 171, issue 3, pp. 459–66.
16. *Autodesk Robot Structural Analysis 2010 - Podręcznik użytkownika*, Autodesk, marzec 2009 r.

OPTIMIZATION OF MOUNTING HOLES LOCATIONS IN STEEL LOW-LEVEL BRIDGE GIRDERS

Summary

In the article the authors optimize the location and size of mounting holes in steel main girders of low-level bridges with regard to the final durability of the span. The issue under analysis related to the optimization of the structure, or more precisely to the location of mounting holes, only in terms of durability.

Keywords: *optimization, mounting hole, military bridge, steel girder, finite elements method*

NOTY BIOGRAFICZNE

dr inż. Artur DUCHACZEK – jest pracownikiem dydaktyczno-naukowym Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki we Wrocławiu. Interesuje się problematyką związaną z szeroko rozumianą inżynierią wojskową, optymalizacją przedsięwzięć logistycznych, a także wytrzymałością zmęczeniową konstrukcji stalowych, w tym propagacją pęknięć zmęczeniowych w mostach wojskowych.

dr hab. inż. Zbigniew MAŃKO – pracownik naukowo-dydaktyczny kilku uczelni w Polsce (Politechnika Wroclawska, Politechnika Opolska, Politechnika Gdanska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Slaska, Akademia Rolnicza i Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wyższa Szkoła Oficerska oraz Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych we Wrocławiu) i zagranicą (Holandia i USA). Specjalista w zakresie obiektów mostowych i konstrukcji stalowych. Autor ponad 550 prac naukowych oraz 7 książek opublikowanych w kraju i w renomowanych czasopismach zagranicznych. Wypromował 13 doktorów nauk technicznych, przy czym trzech z nich zostało profesorami.