

Wpływ liczby poprzecznic na rozkład naprężeń w przęsłach mostów niskowodnych

Artur Duchaczek

Katedra Inżynierii Systemów, Wydział Zarządzania, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki, e-mail: aduchczek@poczta.wp.pl

Streszczenie: Celem niniejszej pracy było określenie wpływu liczby poprzecznic na rozkład naprężeń w przęsłach mostów niskowodnych. W pracy przeanalizowano przęsło mostu jednokierunkowego o szerokości 4 metrów. W obliczeniach uwzględniono przęsło z 6, 7 i 8 dźwigarami oraz 3, 4, 5 i 6 rzędami poprzecznic. Przeprowadzone analizy numeryczne (MES) wykazały, że zarówno liczba dźwigarów, jak i liczba poprzecznic ma znaczący wpływ na rozkład naprężeń w głównych elementach konstrukcyjnych mostów niskowodnych.

Słowa kluczowe: mosty stalowe, metoda elementów skończonych, wytrzymałość materiału

1. Wprowadzenie

Jednym z zadań wykonywanym przez pododdziały inżynierskie wojska polskiego jest urządzenie i utrzymanie przepraw, co wiąże się również z budową i odbudową mostów [1]. Zgodnie z normą obronną [2] ze względu na rodzaj konstrukcji wyróżniamy mosty zmechanizowane (zwane też towarzyszącymi), pływające, składane, prowizoryczne i kombinowane. Uwzględniając natomiast położenie nawierzchni mostu względem lustra wody możemy wyróżnić mosty wysokowodne, niskowodne, nawodne i podwodne. Biorąc pod uwagę aktualne wyposażenie pododdziałów wojsk inżynierskich można stwierdzić, że w warunkach wojennych lub sytuacjach kryzysowych pododdziały wojskowe dość często będą budować mosty niskowodne. Są to obiekty inżynierskie przeznaczone przede wszystkim do krótkotrwałego użytkowania, które z zasady uniemożliwiają prowadzenie żeglugi, spływu kry lodowej oraz przepływu wysokiej wody. Mosty niskowodne często są traktowane jako obiekty tymczasowe, tzn. obiekty przewidziane do przeniesienia w inne miejsce lub do rozbiórki. Przykłady mostów wykonanych w ostatnim czasie przez pododdziały inżynierskie wojska polskiego zaprezentowano na rys. 1.

a)



b)



Rys. 1. Widok mostu niskowodnego wykonanego przez żołnierzy 3. Batalionu Inżynierskiego w miejscowości: a) Raba Wyżna [3], b) Kasina Wielka [4]

W literaturze obcojęzycznej mosty niskowodne wykonywane z kształtowników stalowych określane są m.in. jako „*military nonstandard fixed bridges*” [5], [6], natomiast w nomenklaturze cywilnej częściej występują pod nazwą „*low-water bridge*” [7].

W podręcznikach dotyczących projektowania wojskowych mostów niskowodnych [8], [9], [10], [11] obliczenia wytrzymałościowe przęseł ograniczają się przede wszystkim do prawidłowego dobrania liczby i przekroju poprzecznego dźwigarów głównych. W pracach tych, będących instrukcjami do stosowania w siłach zbrojnych, nie podano konkretnych wytycznych do projektowania liczby poprzecznic (tzw. rozpórek), które wraz z dźwigarami głównymi tworzą konstrukcję nośną. Wydaje się, że liczba poprzecznic oraz ich jakość montażu ma istotny wpływ na rozkład naprężeń w głównych elementach konstrukcyjnych tego typu mostów. Dlatego też celem niniejszej pracy jest określenie wpływu przyjętej konstrukcji nośnej mostów niskowodnych na rozkład naprężeń w ich głównych elementach konstrukcyjnych.

Konstrukcja przęseł mostów niskowodnych bardzo często nie różni się znacząco od konstrukcji mostów wysokowodnych, nawodnych, czy też podwodnych, dlatego też rozważania zaprezentowane w niniejszej pracy można uogólnić na wszystkie rodzaje mostów wykonanych z ogólnodostępnych kształtowników stalowych.

2. Konstrukcja mostu niskowodnego przyjęta do analiz numerycznych i jej obciążenie

Do najcięższego sprzętu gąsienicowego będącego na wyposażeniu wojska polskiego można zaliczyć z całą pewnością czołgi. W tabeli nr 1 zaprezentowano podstawowe parametry określające gabaryty sprzętu będącego obecnie oraz już wycofanego (T-55) z polskiej armii.

Tabela 1. Podstawowe parametry określające gabaryty czołgów [12]

LP.	Parametry	Nazwa czołgu				
		T-55	T-72	PT-91	Leonard 2A4	Leonard 2A5
1.	Długość kadłuba [m]	9,00	9,53	10,30	9,67	9,67
2.	Szerokość [m]	3,27	3,72	3,72	3,70	3,70
3.	Wysokość [m]	2,35	2,19	2,19	2,48	2,60
4.	Szerokość gąsienicy [m]	0,58	0,58	0,58	0,635	0,635
5.	Masa bojowa [t]	36,50	41,00	45,90	55,15	59,50

Z analizy danych zaprezentowanych w tabeli 1 wynika, że masa bojowa tych pojazdów mieści się między 36,50 ÷ 59,50 tony. Aby porównać te pojazdy do obciążenia klasy MLC używanego w krajach członkowskich NATO należy przeanalizować dane zawarte w tabeli 2 przedstawiające wybrane normowe pojazdy gąsienicowe według STANAG-u 2021 [13].

Tabela 2. Parametry charakteryzujące wybrane pojazdy gąsienicowe [13]

LP.	Parametry	Klasa MLC obciążenia gąsienicowego				
		30	40	50	60	70
1.	Długość przylegania gąsienicy [m]	3,35	3,66	3,96	4,27	4,57
2.	Szerokość gąsienicy [m]	0,46	0,56	0,66	0,71	0,79
3.	Szerokość pojazdu na wysokości gąsienic [m]	2,54	2,84	3,25	3,35	3,51
4.	Masa [t]	27,22	36,29	45,36	54,43	63,50

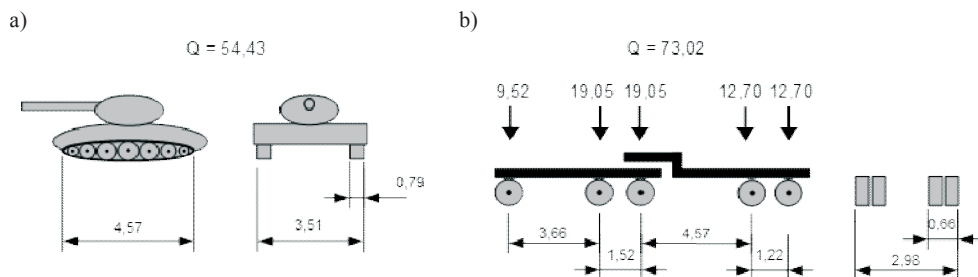
Analizując wartość masy bojowej pojazdów gaśnicowych (tabela 1) oraz masę pojazdów normowych (tabela 2) można stwierdzić, że pojazdy będące na wyposażeniu polskich sił zbrojnych mają zbliżone gabaryty do pojazdów klasy MLC40 ÷ MLC70.

Przeprawa tego typu pojazdów gaśnicowych po obiektach mostowych uregulowana jest również zapisami STANAG-u 2012, w którym określono minimalną wymaganą szerokość jezdni, po której mają się przeprawiać tej klasy pojazdy (tabela 3).

Tabela 3. Szerokość jezdni dla mostów w zależności od przewożonego obciążenia [13]

LP.	Klasa obciążenia MLC	Szerokość jezdni w [m] dla ruchu	
		w jednym kierunku	w dwóch kierunkach
1	4 – 12	2,75	5,50
2	13 – 30	3,35	5,50
3	31 – 70	4,00	7,30
4	71 – 100	4,50	8,20
5	powyżej 100	5,00	nie jest dozwolone

Uwzględniając fakt, że przeprawy ze względów zarówno militarnych, ale i konstrukcyjnych, lepiej wykonywać jako przejścia jednokierunkowe oraz biorąc pod uwagę występujące w polskiej armii pojazdy gaśnicowe (czołgi) wydaje się, że najczęściej wykonywanym obiektem mostowym w warunkach wojennych i sytuacjach kryzysowych będą mosty jednokierunkowe o szerokości 4,00 m. Z tego też względu do obliczeń numerycznych w dalszej części pracy przyjęto obciążenie klasy MLC70 (rys. 2), jako obciążenie maksymalnie dopuszczalne dla tej grupy konstrukcji mostowych (patrz tabela 3).

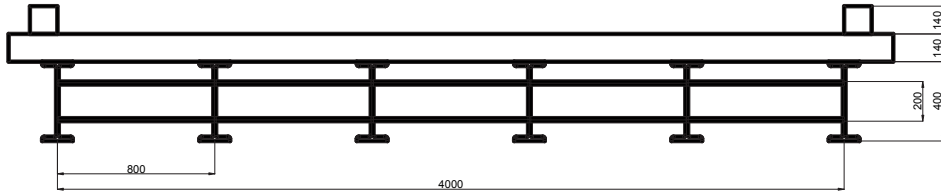


Rys. 2. Schemat obciążenia klasy MLC70: a) gaśnicowego (G), b) kołowego (K) [13] (masa w tonach, długości w metrach)

Zapisy STANAG-u 2021 w kwestii szerokości jezdni nie pokrywają się idealnie z zapisami polskich wytycznych prezentowanych w pracy [10], gdzie szerokość pasa ruchu dla mostu jednokierunkowego przewidziano jako równą 4,20 m, natomiast dla mostu dwukierunkowego 6,00 m. Podane szerokości pasa ruchu nie zależą zatem według pracy [10] od przemieszczającego się po nich obciążenia.

Za częstym stosowaniem pasa ruchu o szerokości 4,00 (ewentualnie 4,20) m, w tym przypadku przemawia również fakt istniejącego na wyposażeniu polskiej armii sprzętu wykorzystywanego do budowy mostów niskowodnych. Najbardziej rozpowszechnionym sprzętem jest urządzenie do bateryjnego wbijania podpór zainstalowane na blokach z parku PP-64 oraz zestaw do wbijania pali montowany na transporterze pływającym PTS-M [10]. Sprzęt ten umożliwia wbijanie podpór pod przęsła o szerokości jezdni 4,20 m.

Uwzględniając powyższe uwagi do dalszych analiz przyjęto przeszło 14 metrowe o szerokości jezdni równej 4,00 m, którego jeden z możliwych wariantów zaprezentowano na rys. 3.



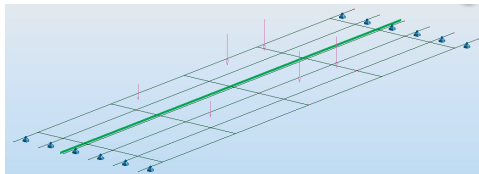
Rys. 3. Przekrój poprzeczny przęsła jednokierunkowego mostu niskowodnego (wymiały w [mm])

Aby dokonać analizy wpływu poprzecznic na wyężenie dźwigarów głównych mostów niskowodnych należy najpierw ustalić liczbę dźwigarów. Ustalając liczbę dźwigarów należy uwzględnić fakt, że nie może ich być zbyt mało, ponieważ wówczas zbyt duża odległość między nimi powodowałaby trudności z dobraniem wymiarów pokładu poprzecznego wykonywanego z drewnianych bali. Z drugiej zaś strony zbyt duża liczba dźwigarów powoduje wystąpienie dużej liczby poprzecznic co utrudnia i wydłuża czas trwania montażu takiej konstrukcji. Przyjmując, że dźwigary tego typu mostów powinny być wykonane z kształtowników o wysokości $300 \div 500$ mm, zaproponowano żeby w przypadku przęsła mostów niskowodnych o szerokości 4,00 m w analizach uwzględnić tylko przęsła o sześciu, siedmiu i ośmiu dźwigarach, co generuje odległości między poszczególnymi dźwigarami odpowiednio około 0,80, 0,67 i 0,57 m.

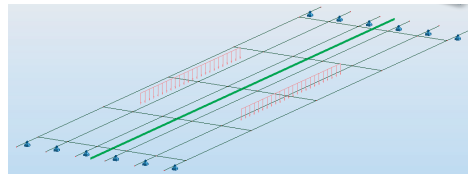
3. Modelowanie i obliczenia w programie Autodesk Robot

Przy wykorzystaniu 2-węzłowych prętowych elementów skończonych przęsło mostu niskowodnego zostało zamodelowane jako ruszt. W obliczeniach numerycznych wykorzystano zarówno pojazd kołowy, jak i gąsienicowy klasy MLC70 (rys. 2) uwzględniając je jako obciążenie symetryczne (K1 i G1) i niesymetryczne (K2 i G2) tzn. uwzględniając mimośród wynikający z różnicy szerokości jezdni i pojazdu. Na rys. 4 przedstawiono przykładowe modele obliczeniowe przęsła mostu niskowodnego zarówno dla mimośrodowego obciążenia kołowego MLC70 (K2), jak i symetrycznego obciążenia gąsienicowego (G1). W pracy nie uwzględniono obciążeń środowiskowych, takich jak wiatr i śnieg.

a)



b)



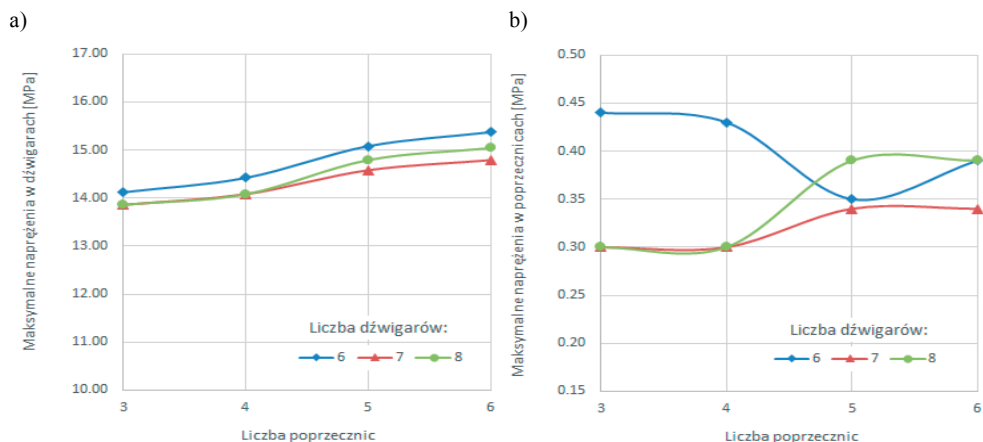
Rys. 4. Widok modelu obliczeniowego przęsła mostu niskowodnego przy obciążeniu: a) kołowym mimośrodowym (K2), b) gąsienicowym symetrycznym (G1)

W obliczeniach wytrzymałościowych wykorzystano opcję tzw. „obciążenia ruchomego”, w której określano parametry pojazdu oraz drogę jego przemieszczania się po analizowanej konstrukcji. Do konstrukcji prętowych typu ruszt można przykładać obciążenia pojazdem kołowym zdefiniowanym za pomocą sił skupionych lub pojazdem gąsienicowym zdefiniowanym jako obciążenie ciągłe. W przypadku sił skupionych przykładane są one jako tzw. „obciążenia prętowe”, tzn. użytkownik programu nie musi tworzyć dla nich dodatkowych węzłów. Przy czym jeżeli siła skupiona nie znajdowała się bezpośrednio nad prętem, wówczas stosowany był algorytm rozkładający ją na najbliższe pręty. W przypadku zaś obciążenia ciągłego musiało ono najpierw zostać zastąpione 10 siłami skupionymi na długości przyjętego obciążenia odpowiadającego długości przylegania gąsienicy [14].

Korzystając z opcji „obciążenia ruchomego” można uzyskać dodatkowe przypadki tego obciążenia oznaczone symbolami „+” i „-“, które określają wartości dla obwiedni odpowiednio górnej i dolnej. W niniejszych analizach uwzględniano tylko wartości naprężeń maksymalnych w dźwigarach głównych i poprzecznicach odczytywane z obwiedni górnej („+”) [14].

4. Analiza wyników obliczeń numerycznych

Uwzględniając jako obciążenie tylko ciężar własny użytych kształtowników stalowych należy stwierdzić, że bez względu na liczbę dźwigarów wraz ze wzrostem liczby poprzecznic rosną naprężenia w dźwigarach, co wynika ze wzrostu masy przęsła (rys. 5a). Dla przęseł z 7 i 8 dźwigarami stwierdzono, że wraz ze wzrostem liczby poprzecznic nieznacznie wzrastają naprężenia w samych poprzecznicach. Odwrotną sytuację stwierdzono natomiast w przęśle z 6 dźwigarami (rys. 5b).

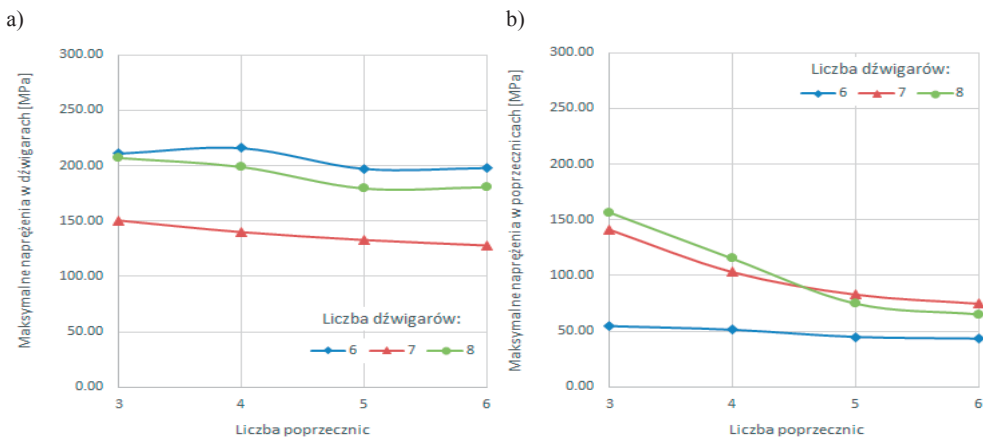


Rys. 5. Wartość maksymalnego naprężenia występującego w: a) dźwigarach, b) poprzecznicach, w zależności od liczby poprzecznic i dźwigarów w przęśle, przy obciążeniu ciężarem własnym konstrukcji

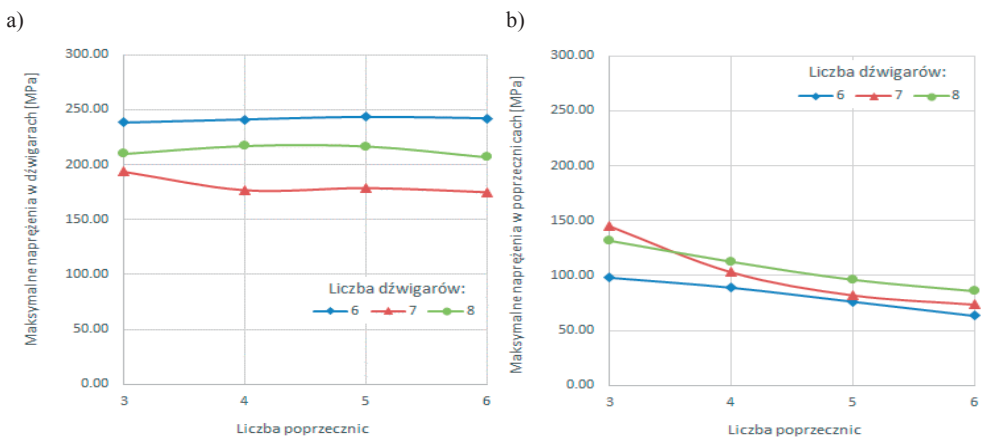
W przypadku uwzględnienia w obliczeniach obciążenia gąsienicowego ustawionego po środku przekroju poprzecznego przęsła (G1) stwierdzono, że generalnie wraz ze wzrostem liczby poprzecznic maleją naprężenia w dźwigarach głównych (rys. 6a), jak i w samych poprzecznicach (rys. 6b). Natomiast w przypadku uwzględnienia w obliczeniach obciążenia gąsienicowego ustawionego z maksymalnym mimośrodem (G2) nie można jednoznacznie

określić wpływu liczby poprzecznic na rozkład naprężenia w dźwigarach głównych (rys. 7a). W tym przypadku również stwierdzono, że wraz ze wzrostem liczby poprzecznic maleją w nich naprężenia (rys. 7b). Dla obu schematów obciążenia gąsienicowego (G1 i G2) można stwierdzić, że nieparzysta (7 sztuk) liczba dźwigarów wpływa korzystnie na wartość maksymalnych naprężeń w nich występujących (rys. 6a i 7a).

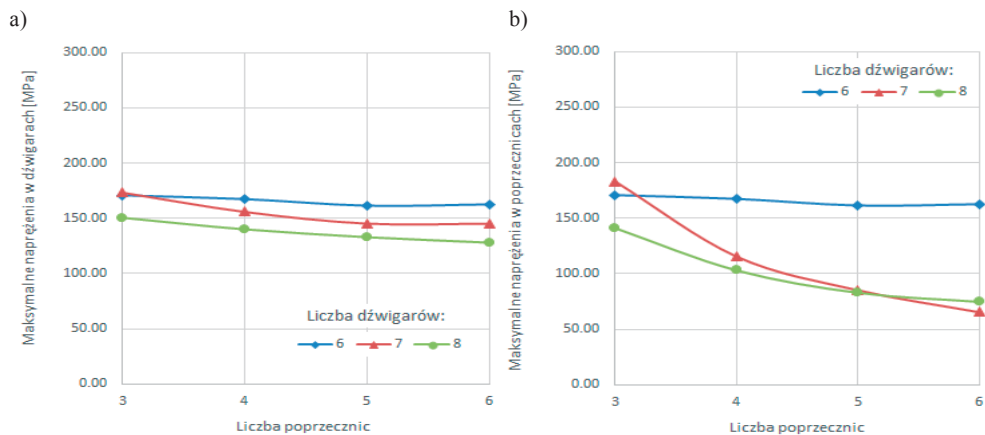
Podobne wnioski wyciągnięto analizując przypadek obliczeniowy gdzie wykorzystano obciążenie kołowe ustawione po środku przekroju poprzecznego przęsła (K1) (rys. 8), jak i z maksymalnym mimośrodem (K2) (rys. 9). Choć w tym przypadku nie stwierdzono korzystnego wpływu nieparzystej liczby dźwigarów (7 sztuk) na wartość naprężeń w nich występujących. Dla schematu K2 stwierdzono natomiast korzystny (choć nieznacznie tylko) wpływ czterech poprzecznic na wartość naprężenia w dźwigarach głównych (rys. 9a).



Rys. 6. Wartość maksymalnego naprężenia występującego w: a) dźwigarach, b) poprzecznicach, w zależności od liczby poprzecznic i dźwigarów w przęsle, przy uwzględnieniu obciążenia gąsienicowego rozmieszczonego symetrycznie (G1)

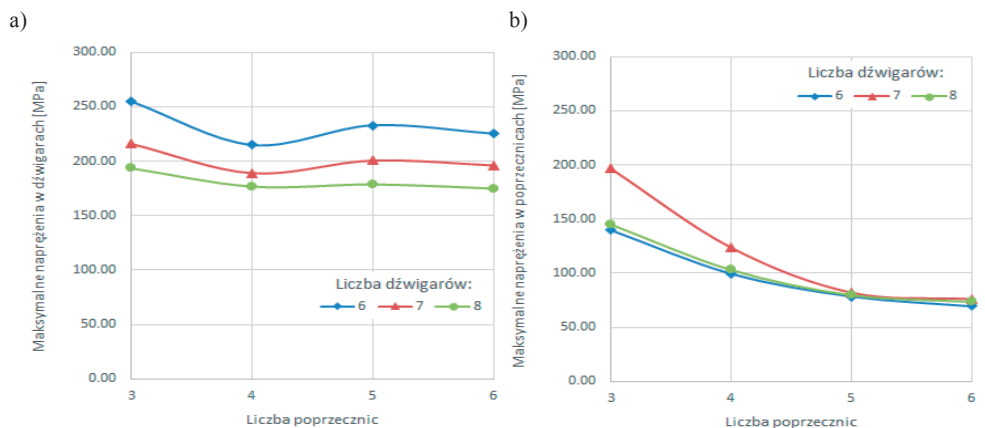


Rys. 7. Wartość maksymalnego naprężenia występującego w: a) dźwigarach, b) poprzecznicach, w zależności od liczby poprzecznic i dźwigarów w przęsle, przy uwzględnieniu mimośrodowego obciążenia gąsienicowego (G2)



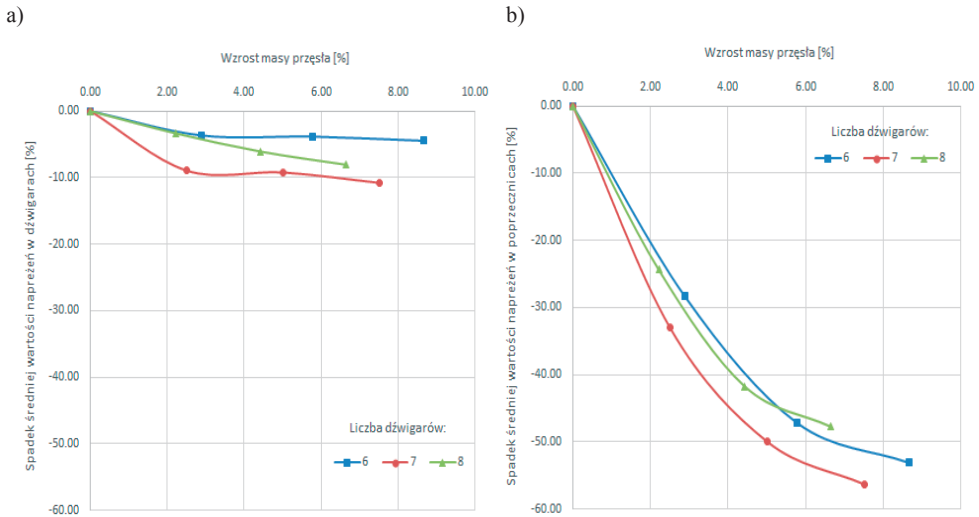
Rys. 8. Wartość maksymalnego naprężenia występującego w: a) dźwigarach, b) poprzecznicach, w zależności od liczby poprzecznic i dźwigarów w przęśle, przy uwzględnieniu obciążenia kołowego rozmieszczonego symetrycznie (K1)

Dla obu schematów obciążenia symetrycznego (G1 i K1) zaobserwowano fakt, że przy sześciu dźwigarach liczba poprzecznic nie wpływa znacząco na wartość maksymalnego naprężenia w poprzecznicach analizowanego przęsła (rys. 6b i 8b), choć wartości naprężeń uzyskane w obu przypadkach znacznie się od siebie różnią.



Rys. 9. Wartość maksymalnego naprężenia występującego w: a) dźwigarach, b) poprzecznicach, w zależności od liczby poprzecznic i dźwigarów w przęśle, przy uwzględnieniu mimośrodowego obciążenia kołowego (K2)

Zwiększając liczbę poprzecznic powodujemy wzrost masy przęsła, co wpływa niekorzystnie na koszty jego realizacji (koszt kształtowników stalowych). Na rys. 10 zaprezentowano wykresy przedstawiające procentowy spadek średniej wartości naprężeń w elementach konstrukcyjnych przęsła w zależności od procentowego wzrostu jego masy, podyktowanego zwiększającą się liczbą poprzecznic. Jako przęsło bazowe przyjęto przęsło z trzema poprzecznicami. Średnia wartość naprężeń w elementach konstrukcyjnych przęsła uwzględniała zarówno ciężar samej konstrukcji, jak i cztery warianty obciążenia (G1, G2, K1 i K2).



Rys. 10. Procentowy spadek średniej wartości naprężeń w dźwigarach (a) i przecznicach (b) przęsła w zależności od procentowego wzrostu jego masy podyktowanego zwiększającą się liczbą poprzecznic.

W analizowanym w pracy przykładzie wzrost liczby poprzecznic powyżej czterech w przypadku przęsła z parzystą liczbą dźwigarów nie wpływa znacząco na spadek średniej wartości naprężeń w tych dźwigarach (rys. 10a). Nie można już jednak takich wniosków wyciągnąć w stosunku do przęsła z 7 dźwigarami. Również analiza danych zaprezentowanych na rys. 10b uniemożliwia jednoznaczne stwierdzenie, w którym momencie wzrost liczby poprzecznic, powodujący zmniejszenie panujących w nich naprężeń, przestaje być opłacalny ze względów ekonomicznych.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone w pracy analizy wykazały, że zarówno liczba dźwigarów jak i liczba poprzecznic ma znaczący wpływ na rozkład naprężeń w głównych elementach konstrukcyjnych mostów niskowodnych. Oznacza to, że pomijanie liczby poprzecznic w procesie doboru dźwigarów mostów niskowodnych jest znacznym błędem i powinno zostać uwzględnione w aktualnie obowiązującym podręczniku przeznaczonym do projektowania mostów wojskowych [10].

Stosowanie przęsła mostowych z jezdnią szerszą od minimalnej określonej w tabeli 3 lub pojazdów węższych niż określone w tabeli 2 niesie za sobą niekorzystne skutki związane z ewentualnym wystąpieniem przeciążenia skrajnych dźwigarów. Zwiększenie różnicy między szerokością jezdni i pojazdu powoduje zwiększenie wartości mimośrod, która przekłada się bezpośrednio na zwiększenie wartości współczynnika poprzecznego ustawienia K_{pu} stosowanego w obliczeniach wytrzymałościowych dźwigarów głównych mostów niskowodnych [10]. Uwzględniając powyższy fakt należy zdawać sobie sprawę, że wnioski zaprezentowane w niniejszej pracy w przypadku uwzględniania w obliczeniach numerycznych rzeczywistych obciążeń (tabela 1) mogą się nieznacznie różnić.

W niniejszym artykule nie dokonano analizy stateczności konstrukcji nośnej przęsła mostów niskowodnych gdyż będzie ona tematem kolejnej publikacji.

Analizy zawarte w niniejszej pracy są efektem badań wykonanych w Wyższej Szkole Oficerskiej Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki w ramach pracy pt. „Wpływ stężeń poprzecznych na trwałość dźwigarów mostów niskowodnych” realizowanej w ramach działalności statutowej.

Literatura

- 1 Regulamin działań wojsk inżynieryjnych wojsk lądowych (tymczasowy). Dowództwo Wojsk Lądowych, Warszawa 2011.
- 2 NO-54-A200. *Mosty wojskowe. Terminologia. Klasyfikacja. Wymagania.*
- 3 Uroczyste otwarcie mostu w Skawie, http://www.2pinz.wp.mil.pl/pl/59_53.html, online: 16.11.2014 r.
- 4 Uroczyste otwarcie mostu w Kasinie Wielkiej, http://www.2pinz.wp.mil.pl/pl/59_67.html, online: 16.11.2014 r.
- 5 Army U. S., *Military Nonstandard Fixed Bridging*. FM5-446, Washington, DC, 1991.
- 6 Ray J.C.; Seda-Sanabria Y., *Technical Commentary on FM3-34.343, "Military Nonstandard Fixed Bridging"*. Engineer Research and Development Center Vicksburg ms Geotechnical and Structures LAB, 2002.
- 7 McDonald T., Anderson-Wilk M., *Low Water Stream Crossings in Iowa. A Selection and Design Guide*. Iowa State University, 2003.
- 8 *Budowa i utrzymanie wojskowych mostów niskowodnych*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych, Sygnatura Inż. 235/1968, Warszawa, 1969.
- 9 *Ustalanie nośności mostów za pomocą nomogramów*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Ministerstwo Obrony Narodowej, Sygnatura Inż. 217/1967, Warszawa, 1967.
- 10 *Mosty wojskowe*. Podręcznik, Ministerstwo Obrony Narodowej, Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych, Sygnatura Inż. 563/92, Warszawa, 1994.
- 11 *Most pozorny opis i użytkowanie*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych, Sygnatura Inż. 456/1980, Warszawa, 1981.
- 12 http://pl.wikipedia.org/wiki/Czo%C5%82gi_Wojska_Polskiego, online: 19.02.2015 r.
- 13 Stanag 2021. *Military Load Classification of Bridges*. Edition no. 6. 7 September 2006.
- 14 Autodesk Robot Structural Analysis 2010. Podręcznik Użytkownika. Autodesk Inc., Marzec 2009.

The influence of number of the transverse connection on the distribution of stresses in the low-water bridge spans

Artur Duchaczek

Department of System Engineering, Faculty of Management, General Tadeusz Kosciuszko Military Academy of Land Forces, e-mail: aduchaczek@poczta.wp.pl

Abstract: The aim of this study was to determine the influence of the transverse connections on the distribution of stresses in the span of low-water bridges. The paper analyzes one-way span bridge with a width of 4 meters. The calculations included a span of 6, 7 and 8 beams, and 3, 4, 5 and 6 rows transverse connections. The analyzes showed that both the number of beams and the number of the transverse connections has a significant impact on the distribution of stresses in the major construction elements of low-water bridges.

Keywords: steel bridges, finite element method, strength of the material

