



RYSZARD CHMIELEWSKI¹⁾
ANDRZEJ WOLNIEWICZ²⁾

CLASSIFICATION OF THE MODERNIZED DMS-65 FOLDED BRIDGE STRUCTURE ACCORDING TO STANAG 2021 REQUIREMENTS

KLASYFIKACJA ZMODERNIZOWANEJ KONSTRUKCJI MOSTU SKŁADANEGO DMS-65 WEDŁUG WYMOGÓW STANAG 2021

STRESZCZENIE. Praca stanowi próbę ustalenia procedur związanych z zastosowaniem wymogów umowy standaryzacyjnej STANAG 2021 ENRG do określania nośności konstrukcji mostu składanego DMS-65, będącego na wyposażeniu Wojska Polskiego. Nadanie wybranym konstrukcjom przęseł mostu składanego odpowiadającym im numerów klasyfikacji wojskowej według wymogów STANAG 2021, daje pogląd na temat możliwości zastosowania ich w operacjach wojskowych NATO. W celu sklasyfikowania wybranych wariantów konstrukcyjnych według określonej procedury, jako obciążenia zostały wybrane pojazdy hipotetyczne klasy MLC 50, 60 70 i 80. Ograniczeniem wyboru klasy obciążenia w stosunku do konstrukcji przęsłowej były jej cechy użytkowe m.in. szerokość pomostu.

SŁOWA KLUCZOWE: mosty składane, nośność konstrukcji, umowa standaryzacyjna STANAG 2021.

ABSTRACT. The paper attempts to establish procedures connected to the application of STANAG 2021 ENRG standardization agreement requirements in order to determine the load-bearing capacity of the DMS-65 folded bridge, which is part of the equipment inventory of the Polish Army. Giving the selected span constructions of a folded bridge their corresponding military classification numbers, in accordance with the STANAG 2021 requirements, provides an indication of their applicability in NATO military operations. Hypothetical vehicles of MLC class 50, 60, 70 and 80 were chosen as the load in order to classify the selected construction variants according to the specified procedure. The structure's utility features, such as platform width, were seen as a limitation in the selection of loading class in relation to the structure of a span.

KEYWORDS: folded bridges, standardization agreement STANAG 2021, structural load-bearing capacity.

DOI: 10.7409/rabdim.017.010

¹⁾ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; ryszard.chmielewski@wat.edu.pl (✉)

²⁾ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa; andrzej.wolniewicz@wat.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Analizie poddano zmodernizowaną konstrukcję mostu składanego DMS-65 w aspekcie spełnienia wymogów standaryzacyjnych STANAG 2021 [1, 2]. Rozpatrzono pięć wariantów rozwiązań konstrukcyjnych mostu składanego DMS-65 [3, 4], wobec których sklasyfikowano nośność pod względem obciążenia wojskowego według wymogów standaryzacyjnych. Jako rozwiązanie pierwsze przyjęto konstrukcję mostu w układzie podstawowym, następnie układ ze wzmocnieniem w postaci nakładki z kraty przestrzennej, wiadukt SWD-83 oraz dwa układy zmodernizowanej konstrukcji DMS-65 z poszerzeniem jezdni mostu do 6,2 m. Poszerzenie takie zostało zaprojektowane i zrealizowane w Wojskowej Akademii Technicznej (WAT), włącznie z badaniami poligonowymi, w ramach pracy badawczej PBU 305 [5]. Tak zmodernizowanej konstrukcji przyporządkowano klasyfikację pojazdów wojskowych na podstawie STANAG 2021 zarówno w układzie podstawowym, jak również w układzie wzmocnionym nakładką. Wyniki klasyfikacji dla wszystkich analizowanych wariantów przedstawiono w formie tablic, które określają możliwy zakres rozpiętości przęsła z uwzględnieniem układów konstrukcyjnych zmodernizowanego mostu składanego DMS-65.

2. WYMOGI STANDARYZACYJNE W CELU WYZNACZANIA WOJSKOWEJ KLASYFIKACJI OBCIĄŻEŃ MOSTÓW MLC W CIĄGU DRÓG PUBLICZNYCH

Omawiana umowa standaryzacyjna NATO STANAG 2021, opublikowana została przez Przewodniczącego MAS (ang. *Military Agency for Standardization*) z upoważnienia Komitetu Wojskowego NATO. Celem opracowania dokumentu było ustanowienie dla sił zbrojnych NATO standardowej metody klasyfikacji dla mostów, promów i tratw oraz pojazdów. Umowa została w Polsce wprowadzona do powszechnego stosowania Zarządzeniem Ministra Infrastruktury nr 38 z dnia 26 października 2010 roku [2, 6]. Dokument zastrzega, że warunki i standardy klasyfikacji wojskowej w niej zawarte, nie mają wpływu na projektowanie i budowę mostów cywilnych. Procedury proponowane w tej umowie opierają się na standardowej metodzie umożliwiającej nadanie numeru klasy, który wskazywałby na relację pomiędzy nośnością (ładownością), a wynikającym z tego oddziaływaniem na konstrukcję. Wynika z tego, że jeżeli numer klasy pojazdu jest mniejszy lub równy numerowi klasy mostu, promu lub tratwy to pojazd może przejechać przez most lub zostać

1. INTRODUCTION

The modernized DMS-65 folded bridge construction was analysed with regards to the fulfilment of STANAG 2021 standardization requirements [1, 2]. Five variants of DMS-65 folded bridge construction solutions [3, 4] were examined and their load-bearing capacity with regards to military load was classified according to standardization requirements. The bridge in a basic configuration was considered as the first solution. The next solutions concerned the structure with reinforcement in the form of a spatial truss overlay, the SWD-83 flyover and also two modernized DMS-65 constructions with bridge deck widening of 6.2 m. The widening was designed and executed in the Military University of Technology (WAT) and tested in military training grounds as part of research project PBU 305 [5]. The classification of military vehicles, which is based on STANAG 2021 requirements, was correlated with a modernized bridge in a basic configuration and also with a bridge reinforced with an overlay. The results of the classification for all analysed variants were presented in the form of tables that specify the possible range of span lengths while considering the constructional systems of the modernized DMS-65 folded bridge.

2. STANDARDIZATION REQUIREMENTS FOR THE PURPOSE OF DETERMINING THE MILITARY LOAD CLASSIFICATION (MLC) OF BRIDGES LOCATED ON PUBLIC ROADS

The aforementioned NATO STANAG 2021 standardization agreement was published by the chairman of the Military Agency for Standardization (MAS) under the authority of the NATO Military Committee. The purpose of developing this document was to establish a standard classification method for bridges, ferries, rafts and vehicles for NATO forces. The agreement was introduced in Poland with the Minister of Infrastructure Regulation No. 38 from 26 October 2010 [2, 6]. The document stipulates that the conditions and standards of military classification do not influence the design and construction of civilian bridges. The procedures proposed in this agreement are based on the standardized method that enables a class number, which indicates the relation between the load-bearing capacity and the impact on a structure resulting from it, to be assigned. It states that if a vehicle class number is smaller than or equal to a bridge, ferry or raft class number, the vehicle may cross the bridge or be

załadowany na prom (tratwę) – w przeciwnym przypadku pojazd powinien zostać zawrócony.

W celu zunifikowania obliczeń, zdefiniowano za pomocą charakterystyk w układzie jednostek metrycznych i angielskich, trzydzieści dwa pojazdy hipotetyczne – szesnaście pojazdów gąsienicowych oraz szesnaście pojazdów kołowych – i ustanowiono trzydzieści dwa numery klas obciążeń [1, 7]. Jako numer standardowej klasy obciążenia, został wybrany ciężar hipotetycznego pojazdu gąsienicowego (wyrażony w tonach amerykańskich). Ciężar hipotetycznego pojazdu kołowego jest większy od jego numeru klasyfikacji wojskowej. Z każdym numerem klasyfikacji wojskowej związane są następujące parametry: całkowita masa pojazdu (ciągnik gąsienicowy), obciążenie przypadające na poszczególne osie pojazdu kołowego, maksymalne obciążenie na pojedynczą oś, maksymalne obciążenie opony, minimalny rozmiar opony oraz maksymalne ciśnienie w oponie.

Klasyfikacja wojskowa mostu, jest określana na podstawie dokumentacji projektowej lub powykonawczej, w drodze kolejnych obliczeń lub poprzez przeprowadzenie próbnego obciążenia. Działania te powinny zapewnić bezpieczny przejazd przez most pojazdów hipotetycznych zgodnie z klasą znamionową. Konstrukcja mostowa może być sprawdzana poprzez kolejne przybliżenia wynikające z obliczeń lub prób w celu określenia, jaki hipotetyczny pojazd może przejechać przez most. Przyjmowanie wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa dla obciążeń wojskowych jest zagadnieniem analizowanym w literaturze światowej [8, 9]. Wartości te w Polsce określa Zarządzenie Ministra Infrastruktury [6].

Przesła mostu należy obciążać kolumnami pojazdów hipotetycznych zadanej klasy, z uwzględnieniem odstępów między pojazdami w kolumnie wynoszących 30,5 m (100 stóp), mierzonych jako odległości między skrajnymi punktami styku z podłożem (Rys. 1). STANAG 2021 nie określa zasad przyjmowania współczynnika dynamicznego, proponuje rozwiązanie tego problemu przez każde państwo ratyfikujące umowę na podstawie doświadczeń cywilnych. Mosty powinny być klasyfikowane tak, aby mogły zapewnić nieskończoną ilość przejazdów dla określonej klasy znamionowej [4, 6]. W tym względzie umowa także pozostawia swobodę w przyjmowaniu współczynnika bezpieczeństwa obiektu mostowego, sugerując jednocześnie jego zmniejszenie dla ruchu wojskowego w stosunku do norm cywilnych.

Przy projektowaniu mostów należy zostawić minimalną wolną przestrzeń o szerokości 0,25 m (10 cali) mierzoną pomiędzy wewnętrzną stroną krawężnika a płaszczyzną wewnętrzną konstrukcji mostowej, od wysokości 305 mm

loaded on a ferry (raft) – otherwise the vehicle should be returned.

In order to unify calculations, thirty-two load class numbers and thirty-two hypothetical vehicles – sixteen hypothetical tracked vehicles and sixteen hypothetical wheeled vehicles – were defined using characteristics in the metric and English unit system [1, 7]. The weight of the hypothetical tracked vehicle (expressed in US tons) was chosen as the number of the standard load class. The weight of a hypothetical wheeled vehicle is greater than its military classification number. Every military classification number is associated with the following parameters: the total vehicle weight (power crawler), the load per each wheel axle of a wheeled vehicle, the maximum load per one axle, the maximum tire load, the minimum tire size and maximum tire pressure.

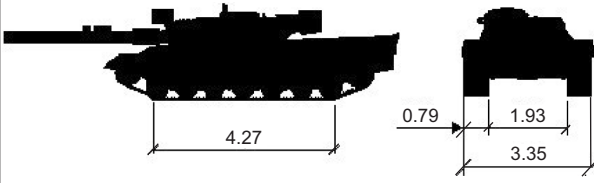
The military classification of a bridge is determined on the basis of design documentation or as-built documentation, the conducting of subsequent calculations or trial loading. These actions should ensure the safe passage of hypothetical vehicles over a bridge according to the standard class. A bridge construction can be verified by subsequent approximations resulting from calculations or tests in order to determine which hypothetical vehicle can cross a bridge. An assumption of the partial values of safety coefficients for military loads is an issue that is analysed in world literature [8, 9]. In Poland, these values are defined in the Minister of Infrastructure Regulation [6].

Spans of bridges should be loaded with columns of hypothetical vehicles of a specified class while taking into account the spacing between vehicles that is equal to 30.5 m (100 ft) and measured as the distance between the nearest ground contact points (Fig. 1). STANAG 2021 requirements do not specify the principles of assuming a dynamic coefficient. They propose that this problem should be solved by every nation state ratifying the agreement on the basis of their civil experience. Bridges should be classified in such a way that they can provide an infinite number of crossings for a specific standard class [4, 6]. In this respect, the agreement also leaves room for the assumption of the safety coefficient of a bridge object and suggests its reduction for military traffic in relation to civil standards.

When designing bridges, a minimal free space with a width of 0.25 m (10 in.) should be left. This width is measured between the inner side of a curb and the inner plane of a bridge structure and from a height of 305 mm (12 in.). In addition, a structure is required to have a minimum headroom of 4.50 m (14 ft. and 9 in.). Table 1 shows the

(12 cali) w górę. Ponadto jest wymagane zachowanie dla konstrukcji minimalnego prześwitu wynoszącego 4,50 m (14 stóp i 9 cali). W Tabl. 1 przedstawiono wymiary i ciężar pojazdu gąsienicowego klasy MLC 60. Przy obciążeniach klasy 60 i wyższych można stosować dualną klasyfikację mostów. Przypadki takie występować mogą w mostach o małej rozpiętości (do około 30,5 m) lub innych obiektach, ze względu na możliwości obciążania ich pomostów. Dualna klasyfikacja mostów pozwala na dopuszczenie do ruchu pojazdów kołowych o klasie wyższej, niż to jest dozwolone dla pojazdów gąsienicowych.

Table 1. A MLC 60 tracked vehicle
Tablica 1. Pojazd gąsienicowy klasy MLC 60

| Class Klasa | Tracked vehicles Pojazdy gąsienicowe |
|----------------|--|
| 60 | <p>Vehicle weight 534 kN (60 US tons) Ciężar pojazdu 534 kN (60 ton amer.)</p>  |

Uwzględniając ruch pojazdów wojskowych, ustalono minimalne szerokości jezdni mostów w zależności od klasy obciążenia, które wynoszą odpowiednio:

- mosty przewidziane do ruchu jednokierunkowego:
 - klasa 4 ÷ 12 2,75 m (9 stóp),
 - klasa 13 ÷ 30 3,35 m (11 stóp),
 - klasa 31 ÷ 60 4,00 m (13 stóp i 2 cale),
 - klasa 61 i wyższe 4,50 m (14 stóp i 9 cali),
- mosty przewidziane do ruchu dwukierunkowego:
 - klasa 4 ÷ 30 5,50 m (9 stóp),
 - klasa 31 ÷ 60 7,30 m (11 stóp),
 - klasa 61 ÷ 100 8,20 m (13 stóp i 2 cale).

W przypadku, gdy szerokości jezdni mostów są mniejsze niż podane, nie jest konieczne obniżanie wartości znamionowej klasy, wystarczające jest ich odpowiednie oznakowanie i wprowadzenie stosownych ograniczeń dotyczących przejazdu pojazdów przez te mosty.

dimensions and weight of a MLC 60 tracked vehicle. Dual classifications of bridges can be used for class 60 or higher loads. Such cases can occur in bridges with a small span (up to about 30.5 m) or other structural objects due to the possibility of loading their platforms. The dual classification of bridges allows the passage of wheeled vehicles that have a higher class than is allowed for tracked vehicles.

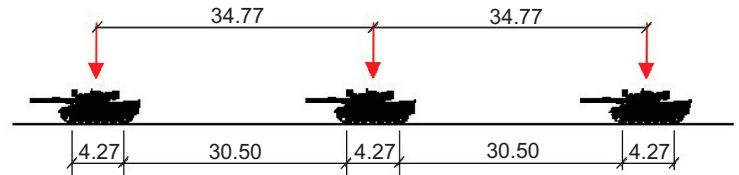


Fig. 1. A column of class 60 hypothetical tracked vehicles
Rys. 1. Kolumna hipotetycznych pojazdów gąsienicowych klasy 60

Considering the passage of military vehicles, the minimum widths of the carriageways of bridges were determined in relation to load class and are equal to:

- for bridges intended for one-way traffic:
 - class 4 ÷ 12 2.75 m (9 ft.),
 - class 13 ÷ 30 3.35 m (11 ft.),
 - class 31 ÷ 60 4.00 m (13 ft. and 2 in.),
 - class 61 i wyższe 4.50 m (14 ft. and 9 in.),
- for bridges intended for two-way traffic:
 - class 4 ÷ 30 5.50 m (9 ft.),
 - class 31 ÷ 60 7.30 m (11 ft.),
 - class 61 ÷ 100 8.20 m (13 ft. and 2 in.).

If the widths of bridge carriageways are smaller than the above-mentioned, it is not necessary to decrease the nominal value of the class. Instead, it is sufficient to appropriately mark them and introduce restrictions regarding the passage of vehicles through these bridges.

3. CHARACTERISTICS OF THE VARIANTS OF FOLDED BRIDGE CONSTRUCTIONS SUBMITTED TO CLASSIFICATION CALCULATIONS

Five construction variants were analysed. The first two are DMS-65 bridges - one in a basic configuration and one with an overlay. They were considered as standard constructions [11]. The next variants consider constructions after modernization – the first one is the SWD-83 flyover, while the other two are DMS-65 bridges with a carriageway widened to 6.2 m in the basic configuration and the

3. CHARAKTERYSTYKA WARIANTÓW KONSTRUKCJI MOSTU SKŁADANEGO PODDANYCH OBLICZENIOM KLASYFIKACYJNYM

Do analizy przyjęto pięć wariantów konstrukcji. Dwa pierwsze to most DMS-65 w układzie podstawowym oraz w układzie z nakładką, które rozpatrywano jako konstrukcje standardowe [11]. Warianty kolejne to konstrukcje po modernizacji, pierwsza z nich to wiadukt SWD-83, natomiast dwie pozostałe to konstrukcje mostu DMS-65 z jezdnią poszerzoną do 6,2 m w układzie z nakładką i w układzie podstawowym. W analizie określono maksymalne długości przęseł w dwóch schematach statycznych, tj. belki wolnopodpartej oraz belki ciągłej. Uwzględniono również minimalną szerokość jezdni zgodnie z ograniczeniami zawartymi w STANAG-u 2021. Poniżej przedstawiono analizowane warianty konstrukcji:

- układ podstawowy mostu DMS-65 (dalej nazywany wariantem I) pod maksymalne obciążenie klasy MLC 60 (Rys. 2),
- układ podstawowy mostu DMS-65 wzmocniony nakładką przestrzenną (dalej nazywany wariantem II) pod maksymalne obciążenie klasy MLC 60 (Rys. 3),
- układ podstawowy wiaduktu SWD-83 (dalej nazywany wariantem III) pod maksymalne obciążenie klasy MLC 60 (Rys. 4),
- układ podstawowy mostu DMS-65 z wydłużoną belką poprzeczną, wzmocniony nakładką (dalej nazywany wariantem IV) pod maksymalne obciążenie klasy MLC 80,
- układ podstawowy mostu DMS-65 z wydłużoną belką poprzeczną, (dalej nazywany wariantem V) pod maksymalne obciążenie klasy MLC 80 (Rys. 5).



Fig. 2. Variant I of a construction, the basic configuration of the DMS-65 bridge

Rys. 2. Wariant I konstrukcji, most DMS-65 w układzie podstawowym

configuration with an overlay. The maximum lengths of the spans in the two static schemes, i.e. the simply supported beam and the continuous beam, were specified in the analysis. The minimum width of the carriageway in accordance with the restrictions contained in the STANAG 2021 requirements was also taken into account. The following variants of the constructions were analysed:

- the basic configuration of the DMS-65 bridge (hereinafter referred to as variant I) under a maximum load of MLC 60 (Fig. 2),
- the basic configuration of the DMS-65 bridge reinforced with a spatial overlay (hereinafter referred to as variant II) under a maximum load of MLC 60 (Fig. 3),
- the basic configuration of the SWD-83 flyover (hereinafter referred to as variant III) under a maximum load of MLC 60 (Fig. 4),
- the basic configuration of the DMS-65 bridge with an elongated transverse beam and reinforced with an overlay (hereinafter referred to as variant IV) under a maximum load of MLC 80,
- the basic configuration of the DMS-65 bridge with an elongated transverse beam (hereinafter referred to as variant V) under a maximum load of MLC 80 (Fig. 5).



Fig. 3. Variant II of a construction, the DMS-65 bridge reinforced with a spatial overlay

Rys. 3. Wariant II konstrukcji, most DMS-65 wzmocniony nakładką przestrzenną



Fig. 4. Variant III of a construction, the SWD-83 flyover

Rys. 4. Wariant III konstrukcji, wiadukt SWD-83



Fig. 5. Variant V of a construction, the DMS-65 bridge with an elongated transverse beam

Rys. 5. Wariant V konstrukcji, most DMS-65 z wydłużoną belką poprzeczną

4. WYNIKI OBLICZEŃ KLASYFIKACYJNYCH KONSTRUKCJI PRZĘŚLOWEJ MOSTÓW SKŁADANYCH

4.1. MODEL NUMERYCZNY KONSTRUKCJI

Praca modelu statycznego konstrukcji, jak najbardziej zbliżona do rzeczywistej, została zamodelowana jako układ powłokowo - prętowy, w którym elementami powłokowymi są belki poprzeczne oraz przepony kraty przestrzennej. Pozostałe elementy konstrukcji to pręty o parametrach przekrojów odpowiadających rzeczywistym, parametry te zostały obliczone na podstawie przyjętego modelu w programie MES Autodesk Robot Structural Analysis, a następnie sprawdzone za pomocą obliczeń opierających się na tablicach do projektowania konstrukcji stalowych oraz wzorów z wytrzymałości materiałów [5, 16].

W celu dokładnego zamodelowania połączenia belki poprzecznej z kratą przestrzenną, ukształtowano ją jako konstrukcję złożoną z paneli ułożonych tak, aby tworzyły przekrój dwuteowy (odpowiadający zaprojektowanej belce poprzecznej), następnie połączono ją z belką poprzeczną w dwóch punktach odpowiadających w rzeczywistości śrubom. Dodatkowo połączono pas dolny dwuteownika belki poprzecznej z pasem dolnym kraty przestrzennej połączeniem sztywnym, co obrazuje styk tych elementów (Rys. 6).

Pomiędzy blokiem krat płaskich, a kratą przestrzenną występuje pewna odległość, wynikająca z oddalenia środków ciężkości pasów dźwigarów od siebie. Wprowadzenie w to miejsce śrub o przekrojach odpowiadających rzeczywistym spowodowałoby przejście obciążenia z górnych dźwigarów. W związku z powyższym w miejscach śrub zastosowano połączenia sztywne (Rys. 7).

4. RESULTS OF CLASSIFICATION CALCULATIONS OF A SPAN CONSTRUCTION OF FOLDED BRIDGES

4.1. THE NUMERICAL MODEL OF A CONSTRUCTION

The behaviour of the static construction model, as similar as possible to real behaviour, was modelled as a rod-shell system in which the shell elements are transverse beams and also transverse members of a spatial truss. The other structural elements are rods with cross-sectional parameters that correspond to real values. These parameters were calculated on the basis of a model created in Autodesk Robot Structural Analysis FEM software and then verified using calculations based on steel construction design tables and material strength formulas [5, 16].

In order to accurately model the connections between the transverse beam and the spatial truss, the truss was designed as a construction composed of panels that are arranged to form an I-section (corresponding to the designed transverse beam). The construction was then connected to the transverse beam at two points that correspond to real bolts. In addition, the bottom flange of the transverse beam I-section was connected to the bottom chord of the spatial truss with a rigid joint. The contact between these elements is presented in Fig. 6.

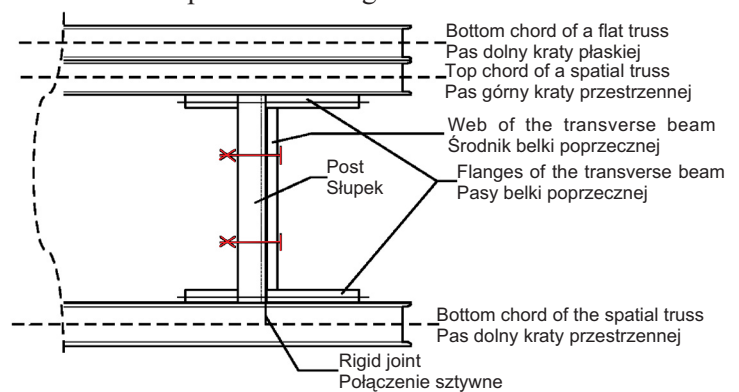


Fig. 6. The scheme of the joint between the transverse beam and the spatial truss of the DMS-65 bridge

Rys. 6. Schemat połączenia belki poprzecznej kratą przestrzenną mostu DMS-65

There is a distance between the block of flat trusses and the spatial truss, which results from the fact that the girders' centres of gravity are offset from each other. The introduction of bolts with cross-sections correlated to real cross-sections would result in the transferring of loads from the top girders. As a result, rigid joints were used at the locations of bolts (Fig. 7).

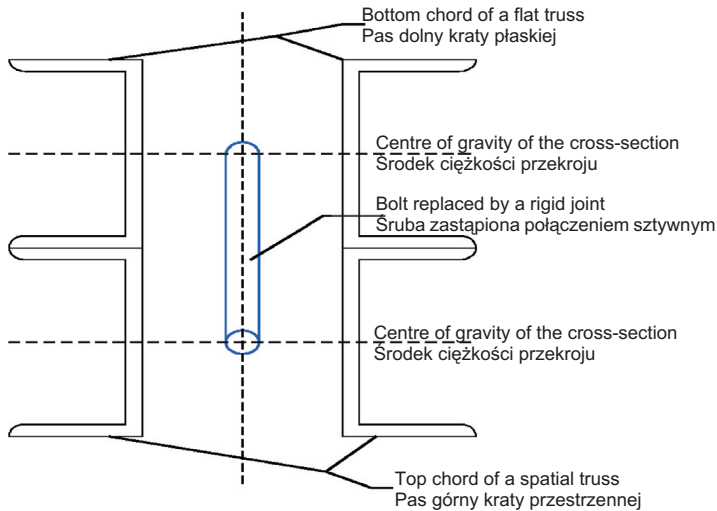


Fig. 7. The connection between the spatial truss and the flat truss
Rys. 7. Połączenie pomiędzy kratownicą przestrzenną a kratą płaską

W efekcie opisanych powyżej zabiegów uzyskano model przestrzennej konstrukcji przedstawiony na Rys. 8.

Obciążenie czołowe zostało przyłożone na czterech belkach poprzecznych, w postaci sił skupionych. Wartość obciążenia została natomiast rozłożona tak, by była zmienna wraz z rozpiętością i przypadała proporcjonalnie na belki (Rys. 9, Tabl. 2).

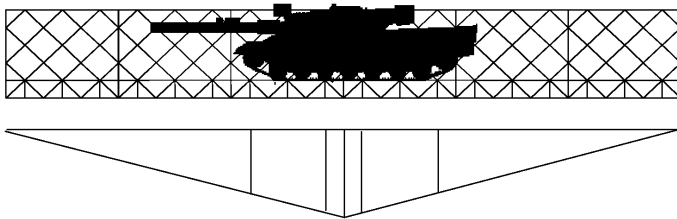


Fig. 9. Scheme of the distribution of the MLC front load on the transverse beams

Rys. 9. Schemat rozłożenia obciążenia czołowego MLC na poprzecznicę

Poprawność modelu konstrukcji mostu DMS-65, została zweryfikowana w trakcie badań poligonowych konstrukcji poszerzonej [5]. Badania przęśla mostu przeprowadzono według ściśle określonych schematów obciążeń próbnych. Jako obciążenia próbne użyto dwa samochody ciężarowe TATRA, które zważono bezpośrednio przed przystąpieniem do badań:

- TATRA „1” – 30 860 kg,
- TATRA „2” – 30 280 kg.

As a result of the actions described above, a spatial model of the construction was obtained and is presented in Fig. 8.

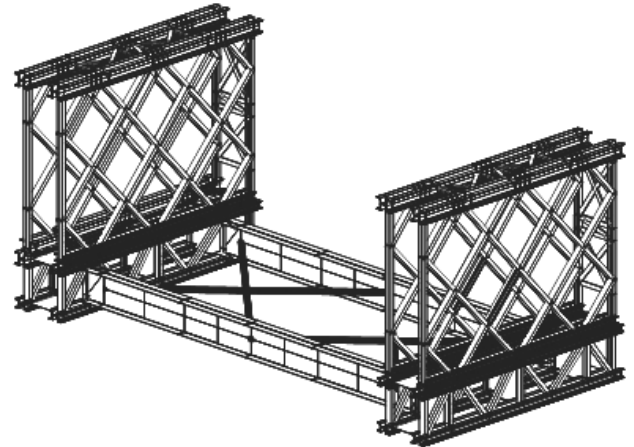


Fig. 8. Spatial model of a DMS bridge section in a basic configuration

Rys. 8. Model przestrzennej odcinka mostu DMS w układzie podstawowym

A front load was applied onto four transverse beams in the form of concentrated forces. However, the load value was distributed so that it was variable with the span and proportionally distributed to the beams (Fig. 9, Table 2).

Table 2. The distribution of load on a span (the division of a force on the transverse beams)

Tablica 2. Rozkład obciążenia na przęśle (podział siły na poprzecznicę)

| Span Rozpiętość [m] | Force 1 Siła 1 [%] | Force 2 Siła 2 [%] |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 12 | 38.89 | 61.11 |
| 18 | 43.33 | 56.67 |
| 24 | 45.24 | 54.76 |
| 30 | 46.30 | 53.70 |
| 36 | 46.99 | 53.01 |

The correctness of the DMS-65 bridge construction model was verified during military field tests of a widened construction [5]. Bridge span tests were conducted according to strictly defined trial load schemes. Two TATRA trucks were used as the trial load and were weighed before the tests:

- TATRA “1” – 30 860 kg,
- TATRA “2” – 30 280 kg.

The load variants varied due to different vehicle positions in the middle of the span and above a support. Tests of the

Warianty obciążeń polegały na zróżnicowaniu ustawienia pojazdów na prześle w środku rozpiętości i nad podporą. Badania konstrukcji od przyjętego obciążenia eksploatacyjnego (dwa samochody TATRA) przeprowadzono w dwóch etapach:

- Etap I – pomiary ugięć mostu bezpośrednio po jego wybudowaniu,
- Etap II – pomiary ugięć i naprężeń mostu w jego elementach po cyklu obciążeń z etapu I.

Opisany program badań miał na celu ustalenie stałego odkształcenia mostu, czyli ugięcia kinematycznego pochodzącego od luzów montażowych, a następnie określenie ugięć sprężystych od obciążenia ruchomego. Do pomiaru naprężeń zastosowano metodę pośrednią, polegającą na pomiarze wydłużeń głównych ε_1 w danym punkcie pomiarowym konstrukcji z wykorzystaniem tensometrii rezystancyjnej (Rys. 10 i 11) [5]. Zmierzona za pomocą tensometru wartość wydłużeń, pomnożona przez moduł sprężystości podłużnej E materiału badanego (205 GPa), wyznacza wartość naprężenia osiowego w analizowanym przekroju [12 -14].

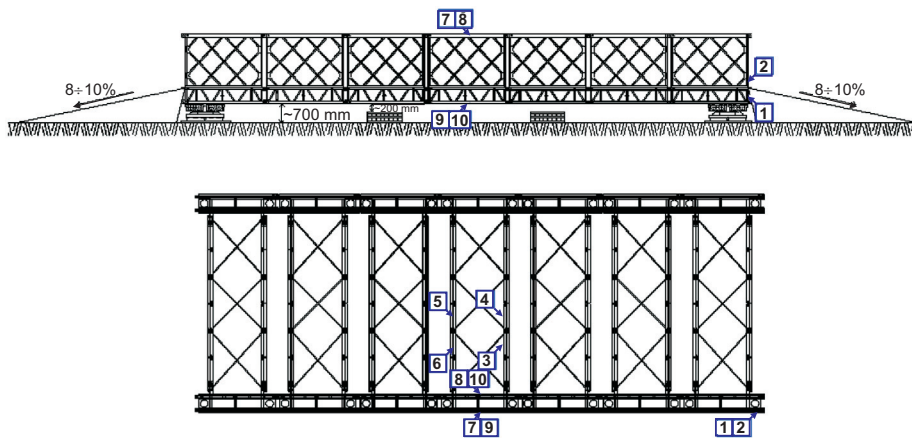


Fig. 10. Scheme of the test stand with the distribution of strain gauge measuring points

Rys. 10. Schemat stanowiska badawczego z rozmieszczeniem punktów pomiarów tensometrycznych

Po przeprowadzonych pomiarach, wykonano numeryczną analizę naprężeń i odkształceń dla wszystkich wariantów obciążeń [14, 15]. Obliczenia wykonano przy pomocy programu Autodesk Robot Structural Analysis. Wyniki badań poligonowych potwierdziły zgodność uzyskanych wielkości sił wewnętrznych i przemieszczeń w modelu teoretycznym [16]. Zestawienie wyników pomiarów uzyskanych z badań poligonowych oraz uzyskanych w wyniku modelowania numerycznego przedstawiono w Tabl. 3 [5].

construction under the assumed operating load (two TATRA trucks) were conducted in two stages:

- Stage I – measurements of bridge deflection immediately after its construction,
- Stage II – measurements of the deflection and stresses of the bridge in its elements after the cycle of loading from stage I.

The described testing program aimed to determine the permanent deformation of a bridge, i.e. kinematic deflection resulting from loose assembly, and then to determine the elastic deflections resulting from the moving load. An indirect method was used to measure stresses and it involved measuring the main elongations ε_1 at a specified measuring point of the structure using resistive strain gauges (Figs. 10 and 11) [5]. The elongation value, which was measured by a strain gauge and multiplied by the longitudinal elastic modulus E of the tested material (205 GPa), determines the value of the axial stresses in the analysed cross-section [12 -14].

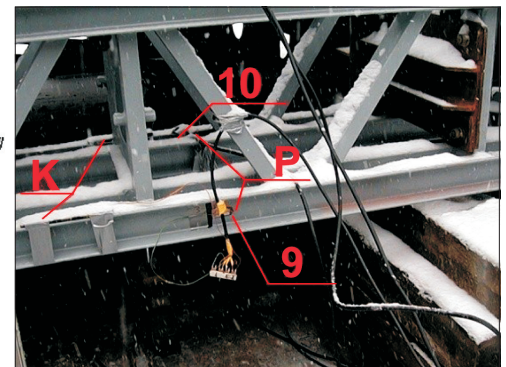


Fig. 11. Strain gauge measuring points located at the bottom chord of the spatial truss
Rys. 11. Pomiarowe punkty tensometryczne na pasie dolnym kraty przestrzennej

After the measurements, numerical stress and strain analysis was performed for all the load variants [14, 15]. Calculations were carried out using Autodesk Robot Structural Analysis software. The results of military field tests confirmed the consistency of the obtained values of internal forces and displacements in the theoretical model [16]. A summary of the results of the measurements obtained from the field tests and also numerical modelling is presented in Table 3 [5].

Table 3. Summary of measurement results
 Tablica 3. Zestawienie wyników pomiarów

| Measuring point Punkt pomiarowy | Stresses obtained in field tests Naprężenia w wyniku badań [MPa] | Stresses obtained in FEM analysis / Naprężenia obliczone MES | | |
|------------------------------------|--|--|----------------------|----------------------|
| | | σ_n [MPa] | σ_{max} [MPa] | σ_{min} [MPa] |
| 1 | 24.6 | 17.2 | 39.0 | 6.16 |
| 2 | 21.0 | 20.8 | 40.0 | 10.58 |
| 7 | 61.1 | 61.0 | 70.6 | 51.4 |
| 8 | 60.9 | 58.3 | 77.9 | 38.7 |
| 9 | -62.8 | -63.1 | -50.3 | -75.9 |
| 10 | -54.9 | -62.4 | -39.4 | -85.5 |

4.2. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

Kryterium decydującym o maksymalnej rozpiętości pod przyjęte obciążenie były wartości maksymalne naprężeń w konstrukcji. Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe zostały przeprowadzone zgodnie z normami polskimi [10] oraz z umową standaryzacyjną STANAG 2021 [1]. W celu sklasyfikowania wybranych wariantów konstrukcji według STANAG 2021, jako obciążenia ruchome zostały zastosowane gąsienicowe pojazdy hipotetyczne klas 50, 60 i 70. Zgodnie z rozporządzeniem [6] do obliczeń przyjęto normę [10] oraz częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla układu obciążeń wyjątkowych [8, 9, 13]. W modelowaniu konstrukcji wzmocnionej nakładką w postaci kraty przestrzennej uwzględniono, że pracują złącza krat przestrzennych, nie uwzględniono natomiast pasa górnego kraty płaskiej.

W Tabl. 4-8 przedstawiono maksymalne rozpiętości przęseł, w zależności od schematu konstrukcji, klasy MLC oraz schematu obciążenia. Dla belki ciągłej przyjęto dwa warianty obciążenia:

- kolumna pojazdów porusza się w rozstawie równym rozpiętości przęseł,
- pojazdy poruszają się w rozstawie równym podwójnej rozpiętości.

Table 4. Maximum length of a span in variant I
 Tablica 4. Maksymalna rozpiętość przęsła w wariantcie I

| Scheme Schemat | | Load class Klasa obciążenia | | |
|--|--|--------------------------------|--------|--------|
| | | MLC 50 | MLC 60 | MLC 70 |
| Simply supported beam Belka wolnopodparta | | 27 m | 24 m | 21 m |
| Continuous beam Belka ciągła | Length of span Rozpiętość przęsła | 36 m | 33 m | 30 m |
| | 2 × Length of span 2 × Rozpiętość przęsła | 42 m | 39 m | 36 m |

4.2. RESULTS OF NUMERICAL ANALYSIS

The maximum stresses in the construction are the criterion that determines the maximum span under the assumed load. Structural and strength calculations were carried out in accordance to Polish standards [10] and standardization agreement STANAG 2021 [1]. In order to classify the selected variants of the construction according to STANAG 2021 requirements, hypothetical tracked vehicles of class 50, 60 and 70 were used as mobile loads. According to regulation [6], both the partial safety coefficient for the exceptional load system and standard [10] were assumed in the calculations [8, 9, 13]. In the modelling of the construction that was reinforced with an overlay in the form of a spatial truss, the joints of spatial trusses were considered while the top chord of the flat truss was not considered.

Tables 4 to 8 show the maximum lengths of spans in relation to the scheme of the construction, the MLC class and the load scheme. The two following load variants were assumed for the continuous beam:

- a column of vehicles moving with a spacing equal to the length of spans,
- vehicles moving with a spacing equal to the double length of spans.

Table 5. Maximum length of a span in variant II
 Tablica 5. Maksymalna rozpiętość przęsła w wariantcie II

| Scheme Schemat | | Load class Klasa obciążenia | | |
|--|--|--------------------------------|--------|--------|
| | | MLC 50 | MLC 60 | MLC 70 |
| Simply supported beam Belka wolnopodparta | | 30 m | 27 m | 24 m |
| Continuous beam Belka ciągła | Length of span Rozpiętość przęsła | 42 m | 39 m | 33 m |
| | 2 × Length of span 2 × Rozpiętość przęsła | 45 m | 42 m | 39 m |

Table 6. Maximum length of a span in variant III

Tablica 6. Maksymalna rozpiętość przęsła w wariantcie III

| Scheme Schemat | | Load class Klasa obciążenia |
|--|--|--------------------------------|
| | | MLC 50 |
| Simply supported beam Belka wolnopodparta | | 9 m |
| Continuous beam Belka ciągła | Length of span Rozpiętość przęsła | 12 m |
| | 2 × Length of span 2 × Rozpiętość przęsła | 12 m |

Table 7. Maximum length of a span in variant IV

Tablica 7. Maksymalna rozpiętość przęsła w wariantcie IV

| Scheme Schemat | | Load class Klasa obciążenia | | | |
|--|--|--------------------------------|--------|--------|--------|
| | | MLC 50 | MLC 60 | MLC 70 | MLC 80 |
| Simply supported beam Belka wolnopodparta | | 27 m | 27 m | 27 m | 21 m |
| Continuous beam Belka ciągła | Length of span Rozpiętość przęsła | 33 m | 33 m | 30 m | 30 m |
| | 2 × Length of span 2 × Rozpiętość przęsła | 39 m | 36 m | 36 m | 33 m |

Table 8. Maximum length of a span in variant V

Tablica 8. Maksymalna rozpiętość przęsła w wariantcie V

| Scheme Schemat | | Load class Klasa obciążenia | | | |
|--|--|--------------------------------|--------|--------|--------|
| | | MLC 50 | MLC 60 | MLC 70 | MLC 80 |
| Simply supported beam Belka wolnopodparta | | 24 m | 21 m | 21 m | 18 m |
| Continuous beam Belka ciągła | Length of span Rozpiętość przęsła | 30 m | 30 m | 27 m | 27 m |
| | 2 × Length of span 2 × Rozpiętość przęsła | 33 m | 33 m | 30 m | 30 m |

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe przeprowadzone w wybranych pięciu wariantach konstrukcyjnych mostu składanego DMS-65 pozwalają, zgodnie z procedurą proponowaną przez STANAG 2021, na przyporządkowanie im wojskowych numerów klasyfikacyjnych w sytuacji obciążeń wyjątkowych. Powyższe rozpiętości dla mostów w układzie poszerzonym, są możliwe do uzyskania pod warunkiem zastosowania łożysk podwójnych na podporach skrajnych (Rys. 12), rozwiązanie takie dotychczas było stosowane jako podparcie na podporach pośrednich w układach ciągłych. Rozwiązaniem alternatywnym może być zaprojektowanie ramy podporowej, analogicznie do przedstawionej w opracowaniu [17], z uwzględnieniem parametrów geometrycznych mostu oraz reakcji podporowych dla rozpatrywanych układów konstrukcyjnych mostu DMS-65.

5. WNIOSKI

Przeprowadzając obliczenia statyczno-wytrzymałościowe dla wybranych wariantów składanej konstrukcji mostu DMS-65, w celu oceny ich nośności według standardów NATO, sklasyfikowano obciążenia charakterystyczne odpowiadające standardowym klasom obciążeń precyzowanym przez STANAG 2021 [1]. W przypadku, gdy szerokość jezdni mostu jest mniejsza od wymaganej zgodnie ze standardami

The structural and strength calculations carried out for the selected five construction variants of the DMS-65 folded bridge enabled military classification numbers in the situation of exceptional loading to be assigned in accordance with the procedure proposed by the STANAG 2021 requirements. The above spans for bridges in the widened system are obtainable under the condition of using double bearings on the outermost supports (Fig. 12). Such a solution has been used as a support on intermediate supports in continuous systems. An alternative solution could be the designing of a support frame in the same way as described in study [17], taking into account the geometrical parameters of the bridge and the support reactions for the examined construction systems of the DMS-65 bridge.

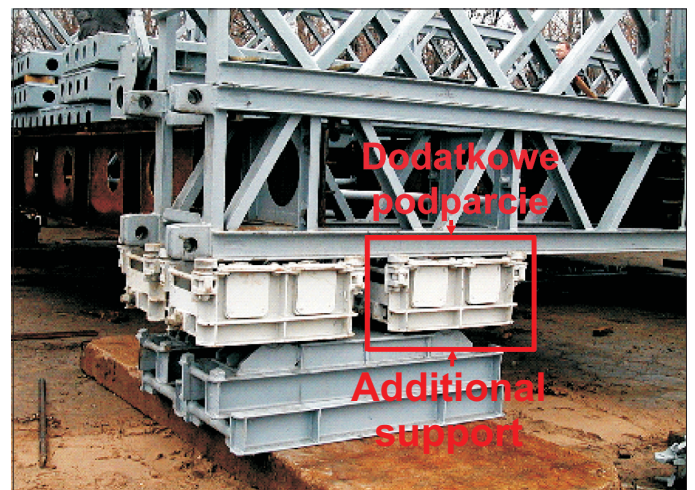


Fig. 12. The method of supporting the widened construction of the DMS-65 bridge

Rys. 12. Sposób podparcia poszerzonej konstrukcji DMS-65

NATO [1], przy wyznaczaniu wojskowej klasy obciążenia takich obiektów nie należy obniżać ich wartości MLC, stąd dla wariantu I i II dopuszczalne jest również obciążenie MLC 70. W takim przypadku w obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych zaleca się przyjmowanie ustawienia osi kolumny pojazdów w osi jezdni pomiędzy krawężnikami lub licami barier ochronnych.

Na podstawie wyników badań poligonowych oraz wyników analiz numerycznych można jednoznacznie stwierdzić, że zaproponowany sposób modelowania umożliwia dokładną analizę numeryczną konstrukcji. Otrzymane wyniki potwierdzają zgodność uzyskanych wielkości sił wewnętrznych i przemieszczeń w modelu teoretycznym oraz w modelu MES.

Wykonując analizę obliczeniową konstrukcji mostów składowanych, zauważono pilną potrzebę zastosowania nowej konstrukcji, która umożliwiłaby szybką budowę przeprawy oraz przepuszczenie kolumny czołgów, w tym znajdujących się na wyposażeniu Wojska Polskiego Leopard 2 [18, 19]. Obecnie maksymalna rozpiętość konstrukcji DMS-65 wzmocnionej nakładką w układzie belki wolnopodpartej dla tych pojazdów wynosi zaledwie 24 m. Zgodnie z klasyfikacją cywilną, most DMS-65 (oraz wszystkie jego wersje rozwojowe) spełnia wymogi tylko klasy C zgodnie z [10], co wynika z nośności elementów pomostu.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Umowa standaryzacyjna NATO - STANAG 2021 Wojskowe obliczenia mostów, promów, tratw i pojazdów
- [2] *Rymsza J.*: Nośność drogowych obiektów mostowych przy obciążeniu pojazdami wojskowymi. IBDiM, Seria S nr 68, Warszawa, 2012
- [3] *Białobrzęski T.*: Mosty składane. WKŁ, Warszawa, 1978
- [4] Ministerstwo Obrony Narodowej - Szefostwo Służby Komunikacji Wojskowej, Drogowy most składany DMS-65. Budowa i eksploatacja. Szefostwo Komunikacji 135/79, Warszawa, 1981
- [5] *Marszałek J.* i in.: Sprawozdanie z pracy PBU 305/WAT/2005 „Projekt koncepcyjny poszerzenia jezdni drogowego mostu składanego DMS-65 do 6,20 m”. WAT, Warszawa, 2005
- [6] Zarządzenie Nr 38 Ministra Infrastruktury z dnia 26 października 2010 w sprawie wyznaczania wojskowej klasyfikacji obciążenia obiektów mostowych w ciągach dróg publicznych
- [7] NATO Standardization Agreements STANAG 2010 Military Load Classification Markings (Oznaczenia wojskowej klasyfikacji obciążeń), ED. 6, 2004

5. CONCLUSIONS

The structural and strength calculations of the selected variants of the DMS-65 bridge construction were carried out in order to assess their load-bearing capacity according to NATO standards. For this purpose, characteristic loads that correspond to the standard load classes specified by STANAG 2021 requirements [1] were classified. In a case when the width of a bridge carriageway is smaller than that required by NATO standards [1], when designing the military load class of such objects, their MLC value cannot be lowered. Therefore, MLC 70 is also acceptable for variants I and II. In such a case, it is recommended in the structural and strength calculations to assume the alignment of the axis of vehicles in the axis of a carriageway between the curbs or between the faces of protective barriers.

Based on the results of military field tests and the results of numerical analysis, it can be clearly stated that the proposed modelling method enables accurate numerical analysis of the structure. The obtained results confirm the consistency of the obtained values of internal forces and displacements in the theoretical model and the FEM model.

During the carrying out of the computational analysis of the folded bridge constructions, an urgent need of using a new structure that would enable the quick construction of a bridge crossing and the passing of a tank column, including Leopard 2 provided by the Polish Army [18, 19], was noticed. For such vehicles, the maximum span of a DMS-65 bridge construction that is reinforced with an overlay in the continuous beam system is currently equal to only 24 m. According to civil classification, the DMS-65 bridge (and all its development variants) only meets class C requirements in accordance with [10]. This results from the load-bearing capacity of platform elements.

- [8] *Lenner R., Keuser M., Sykora M.*: Safety Concept and Partial Factors for Assessment under Military Loading. *Advances in Military Technology*, **9**, 2, 2014, 5-19
- [9] *MacDonald A.J.*: Applying Probabilistic Methods to the NATO Military Load Classification System for Bridges. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, Paper 2570, 2014
- [10] PN-85/S-10030:1985 Obiekty mostowe. Obciążenia
- [11] *Mondel A., Falkowski M.*: Konstrukcje drogowych mostów składowanych. *Zeszyty Naukowe WSOWL*, **174**, 4, 2014, 118-130

- [12] *Glaser L.A.*: Constructability Testing of Folded Plate Girders. MSc Thesis, University of Nebraska - Lincoln, United States, 2010
- [13] *Sit Man Hou*: Field and Analytical Studies of the First Folded Plate Girder Bridge. University of Massachusetts - Amherst, Master Thesis, Paper 46, 2014
- [14] *Sachithanantham P., Anburaj Ebenezar D.*: Analysis of Folded Plate Box Girder Bridges Using Ansys. International Journal of Technology in Computer Science & Engineering, **2**, 2, 2015, 165-174
- [15] *Thomas G.R., Sia B.J.*: A Rapidly Deployable Bridge System. American Society of Civil Engineers, Proceedings of Structures Congress 2013, Vol. 1, Pittsburgh, Pennsylvania, United States, 656-667
- [16] *Duchaczek A., Mańko Z.*: Application of the numerical methods to assessment of the fatigue life of steel military bridges. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **13**, 1, 2014, 23-32
- [17] *Benda M.*: End of the bridge for temporary bridge construction MS set - proposal. 20 Medzinárodná vedecká konferencia "Riešenie krízových situácií v špecifickom prostredí". Fakulta bezpečnostného inžinierstva ŽU, Žilina, Czech Republic, 2015, 43-50
- [18] *Kamyk Z., Szelka J.*: Pokonywanie przeszkód terenowych za pomocą wojskowych konstrukcji składanych, w: Wybrane problemy budownictwa. Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2015, 273-280
- [19] *Szelka J., Kamyk Z.*: Możliwości wykorzystania wojskowego sprzętu przeprawowo-mostowego w sytuacjach kryzysowych. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, Politechnika Poznańska, 19, 2015, 249-260