

Kompozytowe mosty wojskowe

Janusz Szelka¹, Zbigniew Kamyk²

¹ Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki we Wrocławiu, Uniwersytet Zielonogórski, e-mail: jszelka@wso.wroc.pl

² Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej we Wrocławiu, e-mail: kamyk@witi.wroc.pl

Streszczenie: Potrzeby wojsk ekspedycyjnych wymagają stosowania lekkich mostów o ograniczonych gabarytach, tak aby mogły być transportowane drogą powietrzną. USA prowadzi program budowy kompozytowego mostu czołgowego (Composite Army Bridge - CAB) i mostu wsparcia - Modular Composite Bridge – MCB. W roku 2004 CAB przeszedł pomyślnie testy zmęczeniowe. Całkowicie kompozytowe przeszło koleinowe o długości 14 m było obciążane pojazdem klasy MLC 100 (Military Load Class) i wytrzymało 20 tys. cykli obciążenia. MCB będzie zbudowany z 7 m modułów skrzynkowych i 6,5 m ramp wjazdowych. Przeszło o długości 26 m i szerokości 4 m, ma zapewnić przejazd obciążen klasy MLC 65. Także w Kanadzie prowadzone są prace nad mostem kompozytowym, który ma 10 m długości i nośność MLC 30.

Artykuł przedstawia także amerykańską koncepcję zastosowania mobilnego mostu wykonanego na zasadzie konstrukcji zespolonej. Jako deskowanie i zbrojenie płyty wykorzystano prasowane kompozyty poliestrowe FRP. Konstrukcja dźwigarów nośnych wykonana jest z rur aluminiowych w postaci kratownicy rombowej o zakrzywionym pasie dolnym. Po wbudowaniu węzły pasa górnego są zespolone płytą pomostową wylewaną na miejscu.

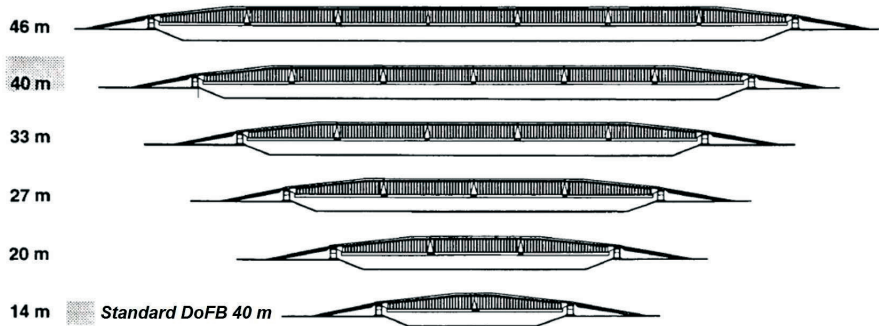
Słowa kluczowe: kompozyty, mosty wojskowe, most szturmowy, modułowy most kompozytowy.

1. Wprowadzenie

W dobie prowadzenia przez wojska wielu operacji pokojowych i akcji humanitarnych na odległych kontynentach, zdolność do transportu drogą powietrzną jest szczególnie pożądaną cechą. Wymusza to poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych mostów o ograniczonej masie i gabarytach, wymagających minimalnej obsługi i mocy maszyn do ich układania.

Początkowo ograniczenie masy uzyskiwano przez powszechne wprowadzenie stopów aluminium do konstrukcji przeszło mostów wojskowych. W mostach pontonowych, stopy aluminium rozpoczęto stosować już od 1946 roku - Light Assault Floating Bridge (LAFB). W latach 80 ubiegłego stulecia stopy aluminium znalazły powszechne zastosowanie w mostach szturmowych i mostach wsparcia [1]. Kolejnym etapem rozwoju było wykorzystanie włókien węglowych (CFRP) do konstruowania belek montażowych (awanbeków) w mostach wsparcia typu Dornier Folding Bridge (DoFB). W pierwszej wersji przeszło DoFB miało 39.5 m długości, a zastosowanie włókien węglowych w konstrukcji belki montażowej, umożliwiło wydłużenie przeszła do 46 m – rys. 1.

Pierwszy na świecie obiekt mostowy z kompozytów polimerowych wybudowano w Chinach w miejscowości Miyun w roku 1982. Od tego czasu liczba obiektów mostowych powstałych z zastosowaniem FRP stale rośnie [2]. O celowości wykorzystania kompozytów w mostach, w tym wojskowych, decyduje przede wszystkim lekkość i wytrzymałość tego materiału, gdyż tzw. współczynnik wytrzymałości właściwej, zdefiniowany jako stosunek wytrzymałości na rozciąganie do ciężaru właściwego, jest korzystniejszy w porównaniu do stali i aluminium. Również odporność korozyjna, w każdych warunkach środowiskowych, jest lepsza od innych materiałów konstrukcyjnych. Z punktu widzenia zastosowań w mostownictwie największe znaczenie mają kompozyty polimerowe wytwarzane metodą pultruzji.



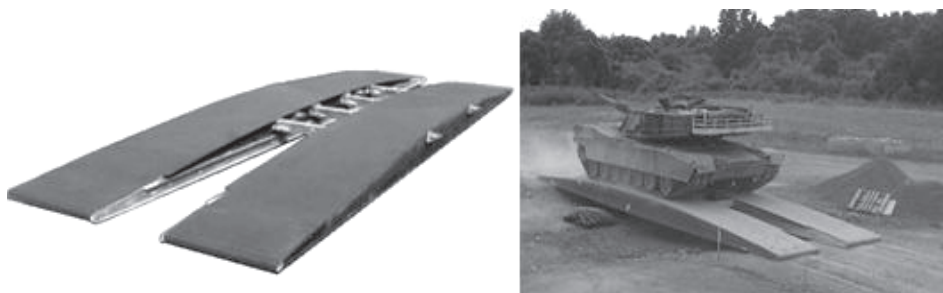
Rys. 1. Skala rozpiętości przęseł z jednego kompletu mostu DoFB (Dornier Faltbrücke) [16]

2. Wojskowe mosty kompozytowe

2.1. Amerykańskie konstrukcje przęsłowe

Armia amerykańska jest najbardziej zaawansowana we wdrażaniu nowych materiałów i nowoczesnych technologii w mostownictwie wojskowym. Nowe konstrukcje dzięki swojej lekkości i wytrzymałości mają zapewnić dużą mobilność własną systemu. Kolejne programy przewidują nawet mosty „samo rozkładające”, wykorzystujące technologie z zakresu robotyki.

Program budowy kompozytowego mostu szturmowego (Composite Army Bridge - CAB) rozpoczęto już w 1998 r. [3] (rys.2). Zasadniczym celem programu było opracowanie nowego systemu mostów, znacznie lżejszych od istniejących, zapewniających pokonywanie przeszkód o rozpiętości do 40 stóp (12,2 m) przez pojazdy o klasie do MLC 100 (90700 kg) [4]. Lekkość konstrukcji powinna zapewnić łatwość jej układania na przeszkodzie łącznie z możliwością automatyzacji i zdalnego sterowania tym procesem. Badania prowadził amerykański instytut pojazdów pancernych TARDEC (US Army Tank Automotive Research, Development & Engineering Center) wspólnie z Uniwersytetem Kalifornijskim w San Diego. Przeprowadzono liczne eksperymenty i analizy numeryczne w celu optymalizacji materiału i struktury konstrukcji przęsła.



Rys. 2. Widok przęsła mostu kompozytowego CAB oraz most podczas prób zmęczeniowych [5]

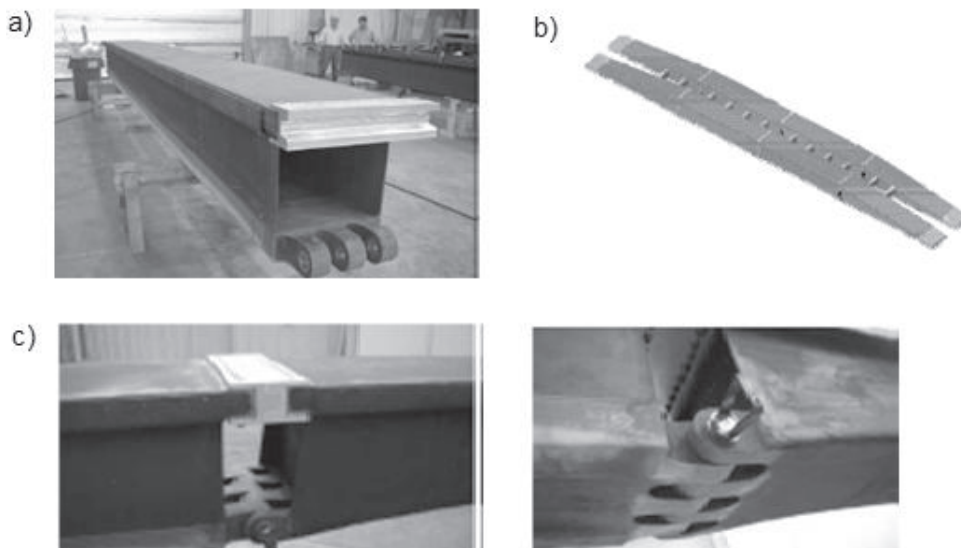
Do optymalizacji wykorzystano analizę metodą elementów skończonych (NASTRAN) i nieliniowe modelowanie procesu zniszczenia (Progressive Failure Analysis - PFA) z pomocą programu GENOA (GENeral Optimization Analyzer) [5]. Przeanalizowano cztery rodzaje materiału osnowy laminatu oraz czternaście rodzajów nawierzchni chroniących pokład z włókna węglowego. Analizowano także procesy zmęczeniowe [6], [7] oraz wpływ temperatury [8], [9]. Ostatecznie, konstrukcja nośna dwukoleinowego przęsła, o długości 14 m i szerokości 4 m, wykonana została z włókna

węglowego (CFRP), z pomostem w postaci paneli typu sandwich z rdzeniem z balsy. Masa przęsła wyniosła mniej niż 6000 kg. W 2000 r. CAB przeszedł pomyślnie pierwsze testy, a w roku 2004 zakończono testy zmęczeniowe. Testy wykazały celowość wzmocnienia najazdów przęsła, które są narażone na duże oddziaływania dynamiczne kół. Wykonano je w postaci aluminiowych nakładek na końce przęsła wykonanych z blachy o grubości 5 mm. Nakładki na długości 915 mm chronią spód przęsła (powierzchnię podparcia), a na długości 760 mm wierzch przęsła.

Badania poligonowe i analizy teoretyczne potwierdziły możliwość wykorzystania kompozytu do budowy mostów wojskowych. Prototyp mostu został przebadany w różnorodnych warunkach, w tym w zakresie zmęczeniowym 20 tys. cykli obciążenia, które nie spowodowało żadnych uszkodzeń – rys. 2.

Kolejnym etapem rozwoju wojskowych mostów kompozytowych są prace nad modułowym mostem wsparcia - Modular Composite Bridge – MCB [10]. Most jest wielodźwigarowym przęsłem zbudowanym z powtarzalnych, 7 m modułów skrzynkowych i 6,5 m ramp wjazdowych (rys. 3). Przęsło o długości 26 m i szerokości 4 m, ma zapewnić przejazd obciążeń klasy MLC 65. Minimalna żywotność przęsła to 5000 przejazdów zadanego obciążenia. Równocześnie z tymi pracami konstrukcyjnymi, opracowywane są zestawy naprawcze do naprawy kompozytów w warunkach polowych.

Doświadczenia uzyskane podczas prac nad mostem szturmowym CAB wykorzystano do opracowania krótkich, 5,6 m przęseł [11], [12]. Przęsło to zaprojektowano zgodnie z wymaganiami trójstronnego porozumienia, USA, Niemiec i Wielkiej Brytanii, w sprawie projektowania mostów wojskowych [13]. Celem optymalizacji konstrukcji przęsła było osiągnięcie minimalnej masy i ugięcia mniejszego niż 15,2 mm. Poszukiwano rozwiązań przęsła o ograniczonej wysokości konstrukcyjnej i wytrzymałości zapewniającej przeniesienie nacisków od koła pojazdów MLC 30. Jako obciążenie testowe wybrano pięcioosiowy pojazd PLS (382 kN), który wywołuje moment zginający 120 kNm i siłę tnącą 122 kN.



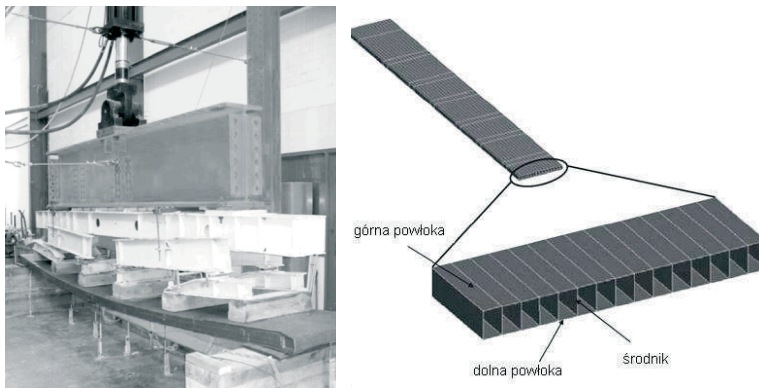
Rys. 3. Elementy przęsła kompozytowego MCB: a) widok modułu skrzynkowego, b) konfiguracja przęsła o długości 26 m, c) widoki połączeń modułów [10]

Doświadczenia uzyskane podczas prac nad mostem szturmowym CAB wykorzystano do opracowania krótkich, 5,6 m przęseł [11], [12]. Przęsło to zaprojektowano zgodnie z wymaganiami trójstronnego porozumienia, USA, Niemiec i Wielkiej Brytanii, w sprawie projektowania mostów wojskowych. Celem optymalizacji konstrukcji przęsła było osiągnięcie minimalnej masy i ugięcia mniejszego niż 15,2 mm. Poszukiwano rozwiązań przęsła o ograniczonej wysokości konstrukcyjnej i wytrzymałości zapewniającej

przeniesienie nacisków od koła pojazdów MLC 30. Jako obciążenie testowe wybrano pięcioosiowy pojazd PLS (382 kN), który wywoływał moment zginający 120 kNm i siłę tnącą 122 kN.

W celu zapewnienia minimalnej masy i odpowiedniej sztywności przęsła zaprojektowano je w postaci kolein składających się z górnej i dolnej powłoki, które są usztywnione poprzez środniki z włókna szklanego, rozmieszczone co 51 mm (rys. 4). Przestrzenie między środnikami zostały wypełnione pianką. Ostateczną wersję środnika wybrano po analizie 5 modeli przedstawionych w pracy [11]. Górna i dolna powłoka, wykonana z warstwowego laminatu węglowego, ma grubość, odpowiednio 11 i 8 mm. Masa tak wykonanego przęsła, z dodatkowymi osłonami wjazdów wynosiła 680 kg.

Wyniki badań paneli koleinowych [12], wykazały, że zastosowanie rdzenia w postaci środników z włókna szklanego daje większą odporność na ścinanie w stosunku do rdzenia z balsy zastosowanego w CAB [6]. Rdzeń przęsła w postaci laminatu z włókna szklanego wykazał wystarczającą wytrzymałość zarówno na obciążenia globalne, jak i na lokalne od nacisku kół lub gąsienic. Odształcenia i ugięcia przęsła, w ciągu 1600 prób przejazdu pojazdu PLS, nie przekroczyły wartości dopuszczalnych. Przęsło zachowywało się liniowo bez oznak trwałych odkształceń lub zniszczeń. Minimalny zapas bezpieczeństwa, wynoszący 13 %, występował w środnikach [12].



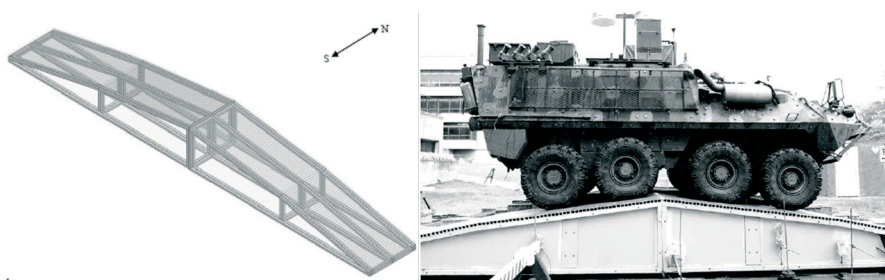
Rys. 4. Próba obciążenia koleiny przęsła i widok modelu MES [12]

2.2. Kanadyjski most kompozytowy dla wojsk ekspedycyjnych

Przęsło zostało zaprojektowane w celu zwiększenia mobilności lekkich pododdziałów w trudnym terenie lub w miejscach gdzie infrastruktura została zniszczona poprzez konflikt lub katastrofę naturalną. Konstrukcja może być montowana na pojeździe i układana na przeszkodzie bez użycia „ciężkiego” wyposażenia.

Dwukoleinowe przęsło, o długości całkowitej 10 m, zmiennym przekroju poprzecznym, z podwójnym załamaniem krzywizny przekroju podłużnego (rys. 5), ma masę około 2 ton. Do budowy dźwigara wykorzystano trzy typy elementów z przeciąganego FRP, są to: 40 mm pomost żebrowany (typu sandwich), płyta o grubości 6,4 mm i zamknięty profil kwadratowy $50,8 \times 50,8 \times 6,4$ mm. Koleina składa się z trzech dźwigarów wykonanych z profilu kwadratowego, każdy ma dolną i górną półkę w postaci rury kwadratowej i środnika. W środku rozpiętości i miejscu załamania przekroju zastosowano usztywnienia poprzeczne. Elementy zostały połączone za pomocą kleju poliuretanowego. Maksymalna wysokość dźwigara w środku jego rozpiętości wynosi 0,953 m, a w jednej czwartej rozpiętości 0,610 m. Konstrukcja może być montowana na pojeździe i układana na przeszkodzie bez użycia „ciężkiego” wyposażenia.

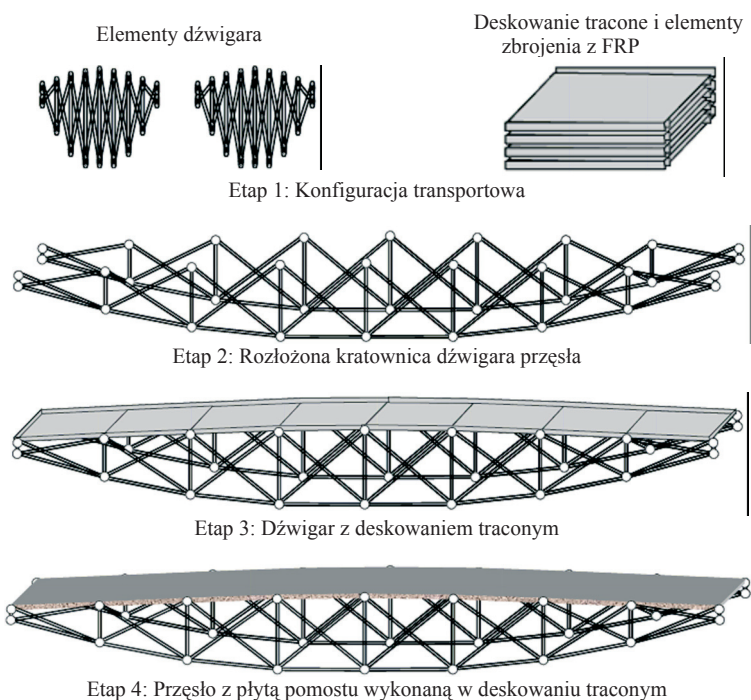
Statyczne i dynamiczne testy, pod obciążeniem pojazdem kołowym klasy MLC 16 oraz analizy MES wykazały, że przęsło tak zaprojektowane jest w stanie przenieść zadane obciążenia. Stosunkowo duża krzywizna przęsła powodowała, że w czasie przejazdu przez przęsło nie wszystkie osie pojazdu stykały się z pomostem. W przyszłości planowane są badania zmęczeniowe i poprawa modelu MES w zakresie symulacji obciążenia rzeczywistego poprzez uwzględnienie niepełnego kontaktu obciążenia z podłożem.



Rys. 5. Schemat konstrukcyjny koleiny przęsła oraz widok przęsła podczas badań pod obciążeniem pojazdem Bison (MLC 16) [13]

2.3. Mobilne kompozytowe mosty zespolone

Aby ograniczyć problemy logistyczne transportu materiałów z Europy lub USA poszukuje się koncepcji rozwiązań ograniczających do minimum koszty i czas transportu. W poszukiwaniach tych przoduje amerykański instytut inżynierii wojskowej - ERDC (US Army Engineer Research & Development Center), który wspólnie z uniwersytetem stanowym Wisconsin w Madison, prowadził wiele badań nad zastosowaniami polimerowych kompozytów włóknistych w konstrukcjach mostowych [14]. Wspólnie opracowano koncepcję budowy mobilnych mostów zespolonych wykorzystujących składane konstrukcje nośne przęseł, transportowane z USA, i pomosty betonowe wylewane na miejscu, w deskowaniu prefabrykowanym z przeciąganych kompozytów włóknistych.

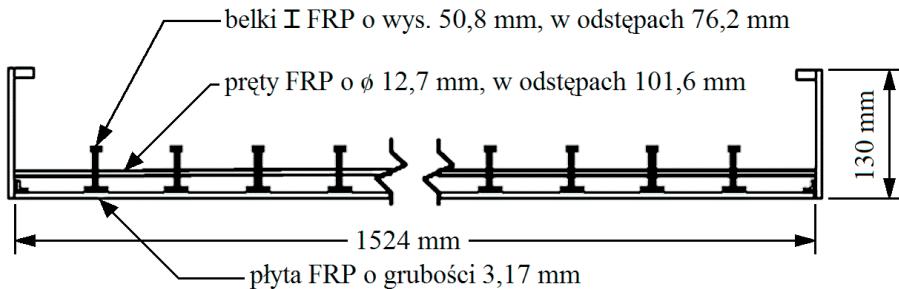


Rys. 6. Koncepcja mostu wraz z sekwencją jego budowy [14]

Most jest przeznaczony do pokonywania przeszkód o rozpiętości do 14 m przez kołowe i gąsienicowe pojazdy klasy MLC 30 [4]. Koncepcja zakłada transport złożonych

elementów konstrukcji nośnej wraz z kompozytowym deskowaniem traconym i systemem zbrojenia kompozytowego. W miejscu wbudowania elementy są rozkładane, z deskowania i zbrojenia montowana jest płyta pomostowa, którą zalewa się betonem wykonanym na miejscu (rys. 6.). Konstrukcję nośną prześła zaprojektowano w postaci składanego dźwigara kratownicowego wykonanego z aluminiowych profili rurowych wykonanych ze stopu 7005 T53.

Konstrukcja płyty pomostu składa się z deskowania i elementów zbrojenia wykonanych z włókna szklanego (GFRP), który przedstawiono na rys. 7. Na zbrojenie pomostu wybrano system komercyjny GirdForm (firmy Strongwell). Zbrojenie podłużne stanowią 2 calowe beki I, a poprzeczne, pręty o średnicy ½ cala. Jako beton wypełniający płytę przewidziano, łatwy do uzyskania w warunkach terenowych, beton standardowy o wytrzymałości 4000 psi (27,6 MPa), bez dodatków.



Rys. 7. Schemat rozmieszczenia zbrojenia w panelu pomostowym [14]

Optymalizacji konstrukcji dokonano dwustopniowo, najpierw osobno dźwigar i pomost, a potem łącznie. Optymalizowano przede wszystkim ze względu na minimalizację masy. W wyniku optymalizacji łącznej konstrukcji nośnej dźwigara i deskowania pomostu z jego zbrojeniem, otrzymano minimalną masę konstrukcji prześła równą 595 kg (bez betonu). Masę tę osiągnięto przy długości przedziału kratownicy 1828 mm i grubości płyty 228,6 mm z rozstawem zbrojenia co 190 mm. Objętość betonu potrzebnego do zalania płyty pomostu wynosiła w tym wypadku 12,2 m³.

3. Podsumowanie

Przedstawione badania wykazały, że istnieje możliwość wykorzystania kompozytów polimerowych do konstruowania mostów wojskowych oraz mobilnych konstrukcji mostów zespolonych. Zastosowanie kompozytów w mostach, zarówno wojskowych jak i cywilnych, daje unikalne zalety wynikające z lekkości i wytrzymałości, w porównaniu do stali i aluminium, jak również najlepszą odporność korozyjną. Dlatego kompozyty polimerowe mają dużą przyszłość w mostownictwie, zarówno przy budowie nowych obiektów, jak i remontowaniu starych.

W USA coraz częściej stosuje się zbrojenie konstrukcji betonowych elementami z FRP. Zawansowane są również badania nad wdrożeniem pomostów kompozytowych do praktyki codziennej. Takie badania są prowadzone obecnie na świecie przez ośrodki naukowe oraz jednostki badawcze z firm produkujących elementy kompozytowe. Można przewidywać, że przyszłościowym rozwiązaniem mostów mobilnych, na warunki kryzysowe, są konstrukcje zespolone, w których w pełni kompozytowy pomost oparty (przyklejony) jest na dźwigarach stalowych. Lekkość i trwałość zbrojenia kompozytowego i deskowań modułowych z FRP oraz rozwój badań nad zastosowaniami kompozytów w konstrukcjach mostowych stanowi o ich przyszłości. Także w Polsce powinny zostać podjęte szersze prace nad zastosowaniem kompozytów w budownictwie cywilnym i wojskowym. Pierwsze próby w zakresie polskiego mostownictwa wojskowego podjęto przy opracowaniu i badaniu demonstratora technologii nowego mostu pontonowego dla Sił Zbrojnych RP [15].

Literatura

- 1 Höglund T., Nilsson L. Aluminium in Bridge Decks and in a New Military Bridge in Sweden, *Structural Engineering International* 4/2006, pp. 348-351.
- 2 Zobel H., Karwowski W. Kompozyty polimerowe w mostownictwie - pomosty wielowarstwowe. *GEONŻYNIERIA drogi mosty tunele* 02/2006 (09). s. 42-49.
- 3 Kosmatka J.B., Policelli F.J. The Development of the DARPA/SBIR Composite Army Bridge: Phase I Accomplishments. *Journal of Advanced Materials*, 31(3), 1999, pp. 23-36.
- 4 STANAG 2021 (EDITION 6) Military Computation of Bridge, Ferry, Raft and Vehicle Classifications, NSA, Brussels, 7 September 2006.
- 5 Mosallam A., Abdi F., Miraj R., Wang J. Virtual Testing and Progressive Failure Analysis of Army Composite Bridge. *FRP INTERNATIONAL*, The Official Newsletter of the International Institute for FRP in Construction, Volume 3, Issue 2 2006, pp 10-15.
- 6 Iyer R., Abdi F., Qian Z., Xiaofeng Su, Mosallam A. Composite Army Bridge under Fatigue Cyclic Loading, Fire and Repair. 3rd International Conference on Advanced Engineered Wood Composites, Bar Harbor, ME, USA, July 10 – 14, 2005.
- 7 Abdi F., Qian Z., Mosallam A., Iyer R., Wang J., Logan T. Composite Army Bridges under Fatigue Cyclic Loading. *Structure & Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle*, Volume 2, Number 1/March 2006, pp. 63-73.
- 8 Abdi F., Qian Z., Miraj R., Mosallam A., Iyer R., Wang J., Logan T. The Residual Strength of Composite Army Bridge after Fire Exposure. 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Newport, Rhode Island, 1 - 4 May 2006.
- 9 Mosallam A., Russell L., Iyer R. Experimental and Numerical Study on Thermal Aging and Mechanical Properties of Composite Army Bridge. *MSC Software Conference*, Huntington Beach, California USA, July 17-19, 2006.
- 10 Iyer R. Repair Kit for Composite Bridges using GENOA. *Modeling & Simulation SMART CONFERENCE*, 8-11 September 2003.
- 11 Robinson M.J., Kosmatka J.B. Light-Weight Fiber-Reinforced Polymer Composite Deck Panels for Extreme Applications. *ASCE - Journal of Composites for Construction*, Vol.12 No. 3 May-June 2008, pp. 344-354.
- 12 Robinson M.J., Kosmatka J.B. Development of a Short-Span Fiber-Reinforced Composite Bridge for Emergency Response and Military Applications. *Journal of Bridge Engineering* © ASCE, July/August 2008, pp. 388-397.
- 13 Landherr J.C., Dynamic Analysis of a FRP Deployable Box Beam. Master of Applied Science Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, September, 2008.
- 14 Hanus J.P., Bank L.C., Velazquez G.I., Ray J.C. Optimized Design and Testing of Prototype Military Bridge System For Rapid In-Theater Construction. In Proc., 25th Army Science Conference – Transformational Army Science and Technology, Asst. Sec. of the Army (Acquisition, Logistics, and Technology), (CD ROM) Orlando, FL. 2006.
- 15 Kamyk Z., Barcikowski M., Błażejowski W., Gašior P., Kaleta J., Rybczyński R., Juskowiak E. Próby poligonowe pontonu kompozytowego. *Materiały Kompozytowe*. 2012, nr 3, s. 34-38.
- 16 Eurobrigde, Mobile Brücken GmbH, D-88039 Fridrichshafen, Germany – Materiały poglądowe dotyczące DoFB.

The application of composites (FRP) in military bridges

Janusz Szelka¹, Zbigniew Kamyk²

¹ *Military Academy of Land Forces in Wrocław, University of Zielona Góra, e-mail: jszelka@wso.wroc.pl*

² *Military Institute of Engineer Technology in Wrocław, e-mail: kamyk@witi.wroc.pl*

Abstract: The needs of expeditionary forces involve the use of light-weight, short-span bridges so that their transport by air would be possible. A project which is currently developed in USA aims at the elaboration of a Composite Army Bridge (CAB) assault bridge and a Modular Composite Bridge – MCB logistic bridge. In 2004 CAB successfully underwent fatigue tests. A 14 m-long, all-composite treadway bridge span was loaded by using an MLC 100 vehicle and it withstood 20 000 load cycles. The MCB will be constructed by 7 m of box modules and a 6.5 m access ramp. A 26 m-long and 4 m-wide bridge span is to provide the traffic ability of MLC 65. Furthermore, works on a 10 m-long, MLC 30 composite bridge are also developed in Canada too.

The paper also presents the American concept of employing a deployable bridge system by utilising a composite structure. In order to formwork and reinforce the plate, fibre reinforced polyester composites (FRP) were used. The girder construction is made of aluminium pipes forming diamond truss with curved bottom chord. After they are integrated in the structure, the top chord nodes are connected through deck plate cast in-situ.

The tests indicated that there exists the possibility of using polymer composites in military bridge construction and mobile structures of composite bridges.

Keywords: composite, deployable bridge, assault bridge, modular composite bridge.