

# Konstrukcje mostowe z materiałów kompozytowych

## Bridge composite structures

KATARZYNA BALKE  
KRZYSZTOF J. KURZYDŁOWSKI\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.323

Pierwsze elementy konstrukcyjne z materiałów kompozytowych zastosowano w budownictwie na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku. W Polsce względnie niedawno zintensyfikowano badania w dziedzinie konstrukcji mostowych i opracowano pierwsze projekty z wykorzystaniem kompozytów. W pracy przedstawiono założenia i kryteria doboru kompozytowych materiałów polimerowych oraz struktury konstrukcji prototypu kładki dla pieszych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** konstrukcje mostowe, materiały kompozytowe, żywica epoksydowa, włókna szklane, włókna węglowe

*Structural members made from composite materials were introduced in building industry at the turn of 60s and 70s of the 20th century. In Poland research studies in the field of composite material bridge structures were undertaken just recently with the first projects of composite material structures following. Presented in the paper are basic requirements as well as criteria for selection of the fiber reinforced polymer materials and an example of pedestrian bridge structure.*

**KEYWORDS:** bridge structures, composites, epoxy resin, glass fibres, carbon fibres

Stalowe elementy konwencjonalnych konstrukcji mostowych, w tym zbrojenia konstrukcji betonowych, są narażone na działanie korozji. Budowa mostów – zwłaszcza nad istniejącymi ciągami komunikacyjnymi – powoduje duże utrudnienia komunikacyjne i związane z nimi straty materialne. Dlatego jedną z głównych tendencji w rozwoju tego typu konstrukcji jest wprowadzanie nowych materiałów, zarówno w celu skrócenia czasu prac budowlanych, jak i zwiększenia ich trwałości [1÷3].

Materiały kompozytowe są szeroko stosowane w budownictwie lądowym, także jako zbrojenie komponentów betonowych oraz liny do podwieszania elementów mostowych. Są również używane do renowacji i wzmacniania zniszczonych konstrukcji mostów. Dotychczas na świecie powstało wiele obiektów mostowych wykonanych w całości lub w części z materiałów kompozytowych (rys. 1). Przykładowo: firma Acciona Infraestructuras zbudowała kładkę dla pieszych o rozpiętości ok. 45 m (rys. 1a) – o osnowie polimerowej zbrojonej włóknem FRP (*Fibre Reinforced Polymers*) [1÷5].

Kompozyty FRP cechuje duża wytrzymałość na rozciąganie, np. laminat wykonany z włókien węglowych ma wytrzymałość na rozciąganie  $R_m \approx 2200$  MPa, a więc czterokrotnie większą niż stal BSt500 stosowana do zbrojenia betonu. Materiały kompozytowe z osnową polimerową umacniane włóknami węglowymi charakteryzują się także małą gęstością ( $\rho = 1,75 \div 2,1$  g/cm<sup>3</sup>), dobrą stabilnością wymiarową, niewielką wrażliwością na odkształcenia cieplne i dobrą odpornością na działanie wielu czynników chemicznych [6].

Istotnym kryterium doboru materiałów kompozytowych na konstrukcje mostów jest dostosowanie kierunku ułożenia włókien do obciążenia i stanu naprężeń w elementach konstrukcji w warunkach eksploatacji [7÷9]. Barię w stosowaniu materiałów kompozytowych jest wciąż ich cena, zwłaszcza w porównaniu z konwencjonalnymi materiałami – stalą i betonem.

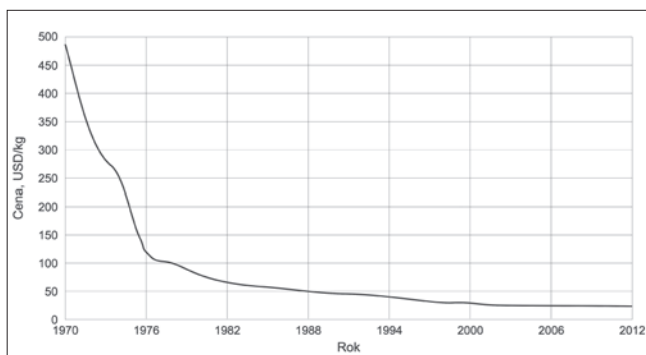


Rys. 1. Kładki dla pieszych wykonane z materiałów kompozytowych: a) Madrycie, b) Kolding (Dania) [2, 5]

Analiza wskazuje jednak, że w przypadku obiektów mostowych w kryterium ekonomicznym należy uwzględnić koszty nie tylko materiałów, lecz także eksploatacji. Konstrukcje kompozytowe są bowiem odporne na korozję – nie trzeba ich więc okresowo wymieniać ani stosować wobec nich ochrony przed działaniem czynników atmosferycznych. Tańszy jest również montaż kompozytowych konstrukcji mostowych, głównie ze względu na mniejszą liczbę elementów i ich małą masę [1÷3]. Należy podkreślić, że technologia wytwarzania elementów konstrukcji z materiałów kompozytowych jest nieustannie udoskonalana i rośnie liczba ich producentów. To wszystko prowadzi do obniżenia kosztów wytwarzania – np. cena włókna węglowego w ostatnim dwudziestolecu spadła o ok. 60% (rys. 2) [10, 11]. Wykorzystanie materiałów kompozytowych w budownictwie jest ograniczone także ze względu na poziom wiedzy na temat ich zastosowania jako elementów konstrukcji budowlanych, w tym mostowych.

W pracy przedstawiono dobór konstrukcji dźwigarów kompozytowych w kładce dla pieszych. Badano materiały kompozytowe – żywicę epoksydową zbrojoną tkaniną z włókien szklanych lub węglowych. Rozpatrzono zagadnienia projektowania kompozytowej konstrukcji nośnej kładki przy wprowadzeniu jednej technologii, z zastosowaniem metody infuzji [1÷3, 12].

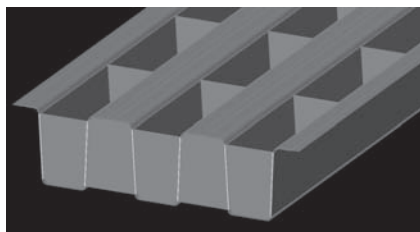
\* Katarzyna Balke (kasia.balke@wp.pl) – Materials Engineers Group Sp. z o.o., Krzysztof J. Kurzydłowski (kjk@inmat.pw.edu.pl) – Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej



Rys. 2. Zmiana ceny 1 kg tkaniny włókien węglowych w latach 1971-2012 (wg firm Toray i Zoltek) [10, 11]

### Założenia projektowe i ogólna charakterystyka opracowanej technologii

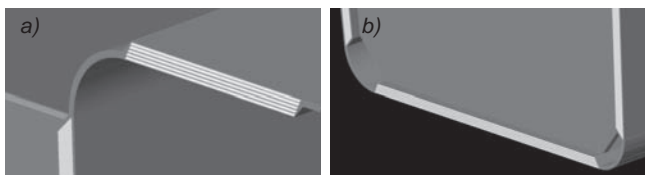
Przyjęto założenie wykonania kompozytowej konstrukcji nośnej kładki (rys. 3). Opracowano taką konfigurację tkaniny węglowej i szklanej, aby uzyskać wymagane rozmiary i kształt dźwigarów kładki. Przygotowaną konstrukcję umieszczano w autoklawie lub szczelnym worku w celu wytworzenia próżni. Następowo było zasysanie żywicy epoksydowej, która impregnowała ułożone tkaniny z włókien węglowych lub szklanych. Metoda infuzji jest powszechnie stosowana w produkcji kadłubów jachtów. Dotychczas nie była używana do wytwarzania konstrukcji budowlanych. Zapewnia ona dobrą wydajność produkcji i dużą powtarzalność właściwości mechanicznych założonych cech wyrobów. Jednocześnie powierzchnia elementu kompozytowego nie wymaga obróbki wykończeniowej – zabezpieczenia i malowania. Zastosowanie tej technologii do produkcji elementów konstrukcji mostowych – dźwigarów – ograniczy koszt ich wykonania, przede wszystkim przez zmniejszenie kosztów pracy.



Rys. 3. Widok kompozytowego dźwigara kładki

Założono także maksymalne wykorzystanie właściwości użytkowych kompozytów w procesie projektowania konstrukcji nośnej kładki [13]. Tak dobrano osnowę z żywicy epoksydowej oraz zbrojenie tkaniny z włókna szklanego i węglowego, by możliwie obniżyć koszty projektowanej kładki.

Przyjęto, że względnie tani kompozyt szklano-epoksydowy, o mniejszej wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m = 1000$  MPa) i ściskanie ( $R_c = 500$  MPa), zostanie wykorzystany w elementach konstrukcji przenoszących obciążenia wywołujące naprężenia ścinające. Natomiast kompozytu z włókien węglowych, znacznie droższego od szklanego (ok. 10-krotnie), ale charakteryzującego się większą wytrzymałością na rozciąganie ( $R_m = 1500$  MPa) i ściskanie ( $R_c = 1300$  MPa), a także większym modułem sztywności, użyto do wzmocnienia profili w przekrojach o największym wyężeniu. Stosowany był więc tylko w górnych i dolnych pasach dźwigarów

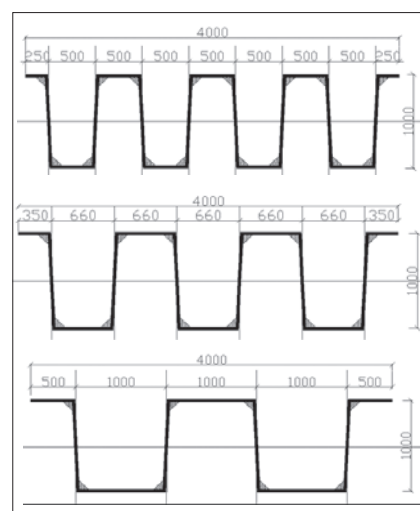


Rys. 4. Położenie tkaniny węglowej w profilu konstrukcji nośnej kładki – pasy: a) górny, b) dolny

(rys. 4). Przenoszą one główne naprężenia ściskające i rozciągające. Dzięki temu ograniczono zużycie tkaniny z włókna węglowego i znacznie zmniejszono koszty produkcji.

### Badania własne

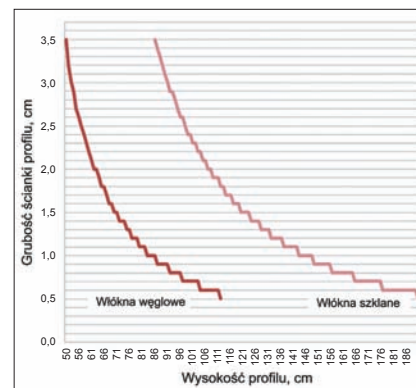
Do opracowania wstępnej geometrii przekroju konstrukcji nośnej przyjęto schemat belki swobodnie podpartej, obciążonej w sposób ciągły. Założono obciążenie standardowe  $Q = 4$  kN/m<sup>2</sup> według normy PN-85/S-10030. Przeprowadzono analizę maksymalnie wyężonych przekrojów: przypodporowego – największa siła tnąca – oraz w środku rozpiętości przęsła – największy moment zginający. Metodą iteracji rozważano ich wzajemne oddziaływanie na stan naprężeń dla różnej geometrii przekroju konstrukcji. Określono zależność pomiędzy wysokością a grubością ścianek i liczbą dźwigarów (rys. 5) oraz obciążeniem i ugięciem dźwigara. Testy utrudniała mała wartość modułu sztywności elementów kompozytowych. Uniemożliwiała ona często wykorzystanie ich dobrych właściwości mechanicznych – wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie.



Rys. 5. Koncepcje geometrii przekroju projektowanej konstrukcji nośnej

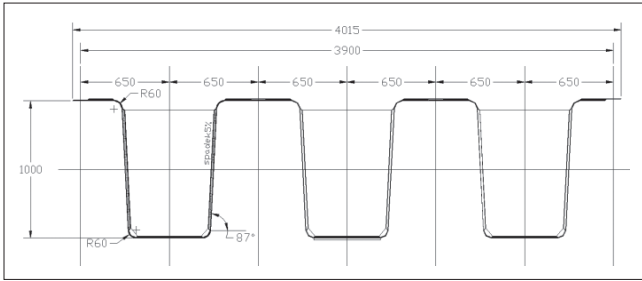
Wysokość i grubość ścianek dźwigarów determinują moment bezwładności przekroju konstrukcji nośnej. Ustalono wpływ tych zmiennych czynników na jej ugięcie. Uzyskane wyniki wskazują, że zmniejszanie grubości ścianek do pewnej wartości wymaga wyraźnego zwiększenia wysokości przekroju ścianki dźwigara, aby zachować założone stałe jego ugięcie (rys. 6). Jednocześnie stwierdzono, że szczególnie niekorzystne jest nadmierne zwiększenie wysokości ścianki – wzrasta pracochłonność i komplikuje to technologię dźwigara. Natomiast zbyt duże zmniejszenie wysokości ścianek dźwigara prowadzi do zwiększenia ich grubości.

Uwzględnienie kryteriów ekonomicznych i technologicznych umożliwiło zmniejszenie liczby rozważanych rozwiązań – ograniczono wysokość ścianki dźwigara do wartości 70-100 cm. Określono geometrię przekroju – rozmiary



Rys. 6. Wpływ zmiany wysokości ścianki dźwigara na jej grubość z zachowaniem stałego ugięcia 10 mm

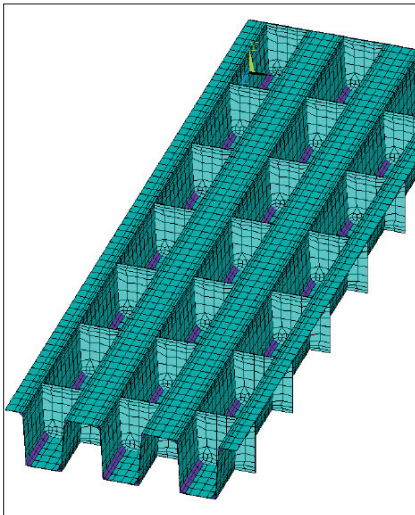




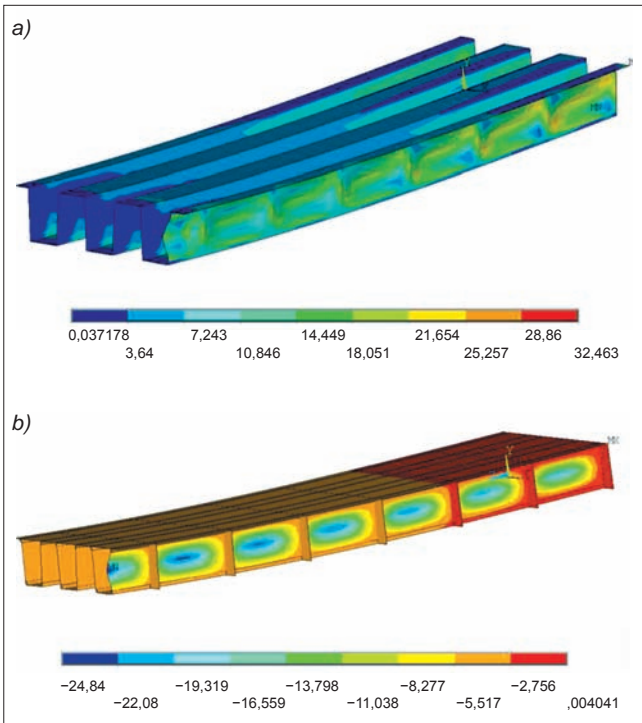
Rys. 7. Geometria przekroju projektowanej konstrukcji nośnej kładki

spełniające w największym stopniu kryteria wytrzymałościowe, pracochłonności i technologiczne (rys. 7).

Obliczenia numeryczne prowadzono metodą elementów skończonych dla określonej geometrii konstrukcji nośnej. Opracowano trójwymiarowy, powłokowo-bryłowy model obliczeniowy dla przyjętego modelu fizycznego konstrukcji nośnej kładki (rys. 8). Symulacja numeryczna umożliwiła wykonanie obliczeń porównawczych dla różnych wariantów



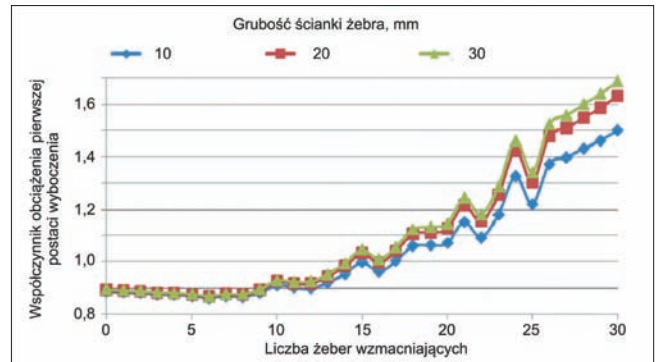
Rys. 8. Model MES konstrukcji dźwigara z wprowadzonymi żebrami wzmacniającymi



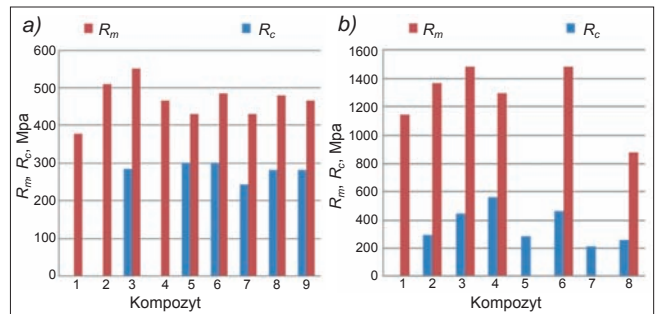
Rys. 9. Symulacja numeryczna przemieszczenia (mm) w kierunku obciążenia od wiatru: a) obciążenie od masy dźwigara, grupy pieszych oraz wiatru, b) lokalne wyoboczenie po wprowadzeniu żeber wzmacniających

projektu i ich optymalizację. Zmiennymi parametrami modelu były charakterystyczne rozmiary przekrojów oraz właściwości wytrzymałościowe materiałów kompozytowych.

Symulacja numeryczna obciążonej konstrukcji kładki wykazała dużą podatność pionowych ścianek dźwigarów na wyboczenie i duże ich ugięcia boczne przy obciążeniu wiatrem zgodnie z normą PN-85/S-10030 (rys. 9). Dlatego wprowadzono żebra wzmacniające do konstrukcji nośnej i określono ich rozmieszczenie (rys. 10). Uwzględnienie tej zmiany było niezbędne także z uwagi na projektowane zamocowanie bariery. Wykazano, że zwiększenie liczby żeber wzmacniających tylko nieznacznie podnosi obciążenie krytyczne. Stąd opracowano inny sposób usztywniania, aby zwiększyć wytrzymałość na wyboczenie ścianek dźwigara. Wprowadzono przekładki piankowe w ściankach pionowych, w których stwierdzono utratę stateczności.



Rys. 10. Wpływ liczby żeber na wartość współczynnika pierwszej postaci wyboczenia



Rys. 11. Wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie wybranych kompozytów zbrojonych włóknem: a) szklanym, b) węglowym

Jednocześnie prowadzono weryfikujące badania laboratoryjne wytworzonych elementów kompozytowych. Określono ich jakość, właściwości mechaniczne (rys. 11) oraz stopień powtarzalności tych właściwości determinowany warunkami procesu technologicznego. Przygotowano bazę stałych materiałowych niezbędnych do opracowania modelu fizycznego konstrukcji dźwigara i kładki. Przyjęty model umożliwia ciągłą korektę określonych parametrów uwzględniających wyniki badań procesu technologicznego oraz właściwości mechanicznych wytwarzanych materiałów kompozytowych.

**Podsumowanie**

Materiały kompozytowe o osnowie z polimeru zbrojone włóknami (FRP) stosowane w konstrukcjach budowlanych od kilkudziesięciu lat są przedmiotem badań w wielu ośrodkach na świecie. Zainteresowanie nimi wynika z dużego potencjału aplikacyjnego tych materiałów, zwłaszcza w warunkach zbliżonych do występujących w Polsce.

Efektem badań jest opracowanie projektu kompozytowej kładki dla pieszych. Zastosowanie materiałów kompozytowych zamiast konwencjonalnych (stali, stopów aluminium,

betonu) umożliwia zwiększenie żywotności konstrukcji mostowych oraz zmniejsza koszty ich eksploatacji. Zaletą proponowanego rozwiązania jest możliwość jego wykorzystania w praktyce.

#### LITERATURA

1. Zobel H., Karwowski W., Sarnowska J., Wróbel M. „Kompozyty polimerowe w mostownictwie”. *Materiały Budowlane* 6 (2004): s. 101÷104.
2. Zobel H., Karwowski W., Sarnowska J., Wróbel M. „Nowa generacja mostów – mosty z kompozytów polimerowych – część I”. *Autostrady* 1+4 (2004): s. 6÷19.
3. Zobel H., Karwowski W., Sarnowska J., Wróbel M. „Nowa generacja mostów – mosty z kompozytów polimerowych – część II”. *Autostrady* 6÷19 (2004): s. 54÷63.
4. Philips L.N. „*Design with Advanced Composite Materials*”. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
5. <http://www.fiberline.com/fiberline-bridge>
6. German J. „*Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych*”. Kraków: Wyd. Politechniki Krakowskiej, 1996.
7. Skinner J.M. “A Critical Analysis of the Aberfeldy Footbridge”, Scotland. Proc. *Bridge Engineering 2 Conference*, Bath 2009, UK
8. Bduleba B., Greskovic F. “Deformation and Safety Factor Simulations of Polymer-Matrix Structures with Solidworks Software”. *Composite Theory and Practice* 12 (2012) 1: pp. 14÷22.
9. Kozioł M. “The Effect of Reinforcing Fabric Type on Mechanical Performance of Laminar FR Epoxy Composite”. *Composite Theory and Practice* 12 (2012) 1: pp. 60÷65.
10. <http://www.toraycompam.com/>
11. <http://www.zoltek.com/>
12. Myalski J. „Określenie warunków infiltracji w infuzyjnej metodzie wytwarzania laminatów poliestrowo-szkłanych”. *Kompozyty* 2 (2009): s. 138÷143.
13. Bełzowski A. „Zasady doboru współczynników bezpieczeństwa konstrukcji z materiałów kompozytowych”. *Kompozyty* 4 (2004) 12: s. 396÷403. ■