

## **Kompozyt przekładkowy GFRP z rdzeniem PET w powłokowej konstrukcji kładki dla pieszych**

**Jacek Chróścielewski<sup>1</sup>, Marian Klasztorny<sup>2</sup>, Mikołaj Miśkiewicz<sup>1</sup>,  
Łukasz Pyrzowski<sup>1</sup>, Magdalena Rucka<sup>1</sup>, Krzysztof Wilde<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, e-mail: jchrost@pg.gda.pl,  
lpyrzow@pg.gda.pl, mmisk@pg.gda.pl, mrucka@pg.gda.pl, wild@pg.gda.pl*

<sup>2</sup> *Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, e-mail: m.klasztorny@gmail.com*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono badania doświadczalne materiału przekładkowego zastosowanego w innowacyjnym rozwiązaniu mostu dla pieszych. Kładka o konstrukcji powłokowej wykonana jest z kompozytu przekładkowego i jest wytworzona w całości bez złączy w technologii infuzji. Artykuł przedstawia wyniki badań doświadczalnych okładzin, pianki PET oraz testy 3- i 4-punktowego zginania belek wykonanych z materiału przekładkowego. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych stanowią dane walidacyjne do modeli numerycznych konstrukcji kładki użytych w projektowaniu.

**Słowa kluczowe:** kładka dla pieszych, dźwigar przekładkowy, okładki GFRP, rdzeń piankowy PET, technologia infuzji.

### **1. Wprowadzenie**

Na świecie zbudowano około 600 mostów, w których elementy konstrukcyjne wykonane są z kompozytu wzmocnionego włóknem szklanym (GFRP) [1]. Jednakże, według aktualnej wiedzy autorów referatu, nie powstał jeszcze obiekt mostowy o konstrukcji powłokowej przekładkowej z rdzeniem piankowym, w której okładziny wykonywane są z laminatów wzmocnionych włóknem szklanym, a cała konstrukcja wytworzona jest w całości bez złączy, w technologii infuzji [2].

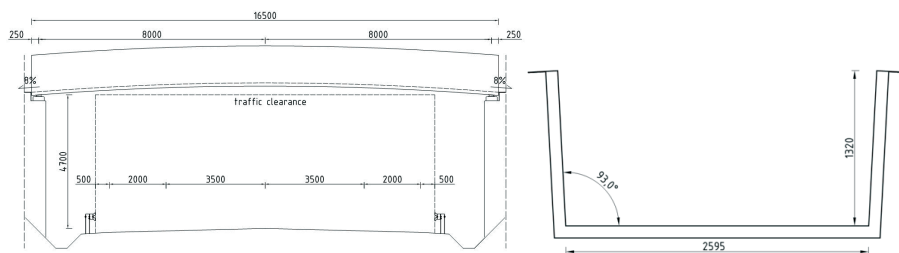
Pomysł opracowania powłokowej kompozytowej kładki dla pieszych powstał w roku 2008 i został zarejestrowany w formie wniosku badawczego w roku 2009. Projekt uzyskał finansowanie w roku 2012 i jest realizowany pod akronimem FOBRIDGE (PBS1/B2/6/2013) przez konsorcjum w składzie: Politechnika Gdańska (lider), Wojskowa Akademia Techniczna, ROMA Sp. z o.o. Celem projektu jest wykonanie prac badawczych, które pozwolą na opracowanie architektoniczno-materiałowo-konstrukcyjne kompozytowych przęseł mostów dla pieszych o schemacie statycznym swobodnie podpartego dźwigara, do zastosowania przede wszystkim nad głównymi drogami ruchu przyspieszonego.

Podstawowym założeniem koncepcji kładki jest powtarzalność jej konstrukcji nośnej, która umożliwi w przyszłości wypracowanie produktów standardowych, sprzedawanych w Internecie lub dostępnych w marketach budowlanych. Proponowana kładka pieszo-rowerowa ma szerokość użytkową 2,5 m oraz maksymalną długość 16 m. Produkcja obiektu realizowana będzie z ogólnodostępnych materiałów, a czas produkcji obiektu nie przekroczy kilku dni. Podstawowym celem realizowanych badań jest opracowanie rozwiązania kładki o rozpiętości 16 m, której cena i koszty utrzymania będą konkurencyjne, a nawet z czasem znacznie niższe w porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami z zastosowaniem stali, betonu lub drewna.

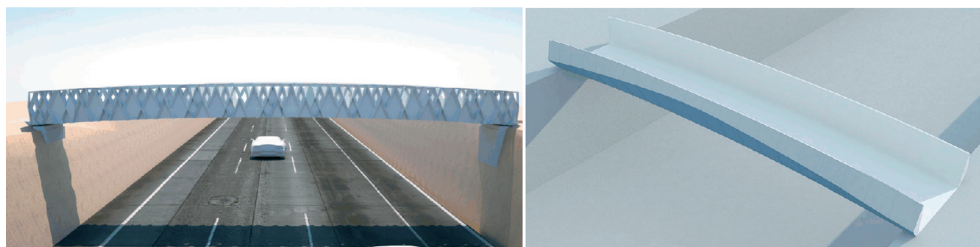
Proponowane rozwiązanie kładki dla pieszych z wykorzystaniem materiałów kompozytowych jest zgodne ze współczesnymi tendencjami w inżynierii mostowej, dotyczącymi coraz szerszego zastępowania tradycyjnych materiałów budowlanych materiałami nowymi o lepszych cechach wytrzymałościowo-eksploatacyjnych. Warstwowe konstrukcje kompozytowe charakteryzują się następującymi właściwościami: relatywnie mały ciężar objętościowy, relatywnie duże wytrzymałości właściwe, możliwość zapewnienia odpowiednio wysokich sztywności globalnych i lokalnych, możliwość zapewnienia wysokiej odporności na czynniki atmosferyczne, możliwość zapewnienia trwałości do kilkudziesięciu lat, relatywnie duże tłumienie materiałowe drgań, łatwe kształtowanie prefabrykatów o dowolnym kształcie.

## 2. Opis konstrukcji kładki i technologia jej produkcji

W projekcie badawczym FOBRIDGE analizowane są różne rodzaje konstrukcji o założonej rozpiętości teoretycznej pojedynczego przęsła wynoszącej 16 m. W niniejszym artykule przedstawione jest preferowane rozwiązanie kładki, w którym dźwigar zbudowany jest z kompozytu przekładkowego (rys. 1). Przyjęta rozpiętość obiektu wynika z szerokości skrajni drogowej jednojezdniowej (dwa pasy ruchu) drogi ruchu przyspieszonego, nad którą kładka ma przeprowadzić ruch pieszy i rowerowy oraz – przy odpowiednich dojazdach – pozwolić na przejazd pojazdu serwisowego lub karetki pogotowia ratunkowego. Zakłada się również wykorzystanie projektowanego przęsła nad innymi przeszkodami (drogi samochodowe, kolejowe, przeszkody wodne itp.) oraz sugeruje się zastosowanie takich obiektów jako rozwiązań przepraw tymczasowych na obszarach dotkniętych klęskami żywiołowymi.



Rys. 1. Kładka kompozytowa: widok z boku oraz przekrój poprzeczny



Rys. 2. Koncepcje architektoniczne kładki kompozytowej

Ściany boczne dźwigara typu U są jednocześnie poręczami o wysokości 1,3 m. Obiekt ma bardzo małą wysokość konstrukcyjną, która wynosi zaledwie kilkanaście centymetrów. Przyjęto, że geometria konstrukcji nośnej w widoku z boku, opisana jest na łuku kołowym, a maksymalny spadek podłużny nie przekracza 8%. Wybrane warianty form architektonicznych kładki, nadające jej lekkość poprzez grę kolorem, światłem i fakturą, przedstawione są na rys. 2 [3]. Wszystkie elementy składowe struktury typu sandwich są elementami nośnymi.

Kładka zostanie w całości wykonana w technologii infuzji. Technologia ta pozwala na wytworzenie produktu w formie, w której pod membraną foliową w worku próżniowym ułożone są tkaniny szklane i panele pianki PET. Pomiędzy formą i workiem próżniowym wytwarzane jest podciśnienie, które powoduje zasysanie żywicy, a tym samym przesycenie tkanin i pianki żywicą (rys. 3). Próby technologiczne obejmowały wykonanie testów właściwości zastosowanych żywic (czas polimeryzacji, temperatura wiązania, lepkość, przesycanie) oraz ustalenie wybranych parametrów procesu infuzji, takich jak minimalne i maksymalne parametry nadciśnienia i podciśnienia, przebieg procesu polimeryzacji z uwzględnieniem jakości i drogi zwilżania, określenie kierunków przepływu oraz zbadanie potencjalnych zakłóceń hydrotechnicznych w wytypowanych elementach. Wynikiem prób jest dobór parametrów technologicznych i urządzeń wytwórczych do produkcji kładki.



Rys. 3. Stanowiska testowe do prób technologicznych

### 3. Badania doświadczalne materiału przekładkowego

Celem badań doświadczalnych było uzyskanie danych walidacyjnych do modeli obliczeniowych laminatu, pianki i materiału przekładkowego. Testy trójpunktowego i czteropunktowego zginania belek wykonanych z materiału przekładkowego miały na celu także określenie mechanizmów zniszczenia.

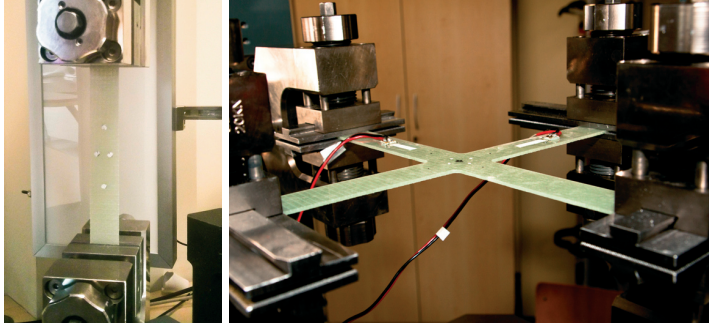
#### 3.1. Rozciąganie jednoosiowe i dwuosiowe okładzin

Badania okładzin przeprowadzono na próbkach laminatu wykonanych z czterech warstw tkanin z włókna szklanego w orientacji  $[0/90]$ . Zrealizowano dwa rodzaje testów: badania jednoosiowego rozciągania na próbkach w kształcie płaskownika o wymiarach  $250 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 2,7 \text{ mm}$  oraz badania dwuosiowego rozciągania na próbkach krzyżowych o wymiarach  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 2,4 \text{ mm}$  z wyokrągleniami naroży o promieniu  $5 \text{ mm}$  (rys. 4). Testy wykonano z użyciem jednej (testy jednoosiowe) lub czterech (testy dwuosiowe) maszyn wytrzymałościowych Zwick/Roell Z020. Do pomiaru odkształceń wykorzystano videoekstensometr videoXtens. Testy jednoosiowe zrealizowano z prędkością przemieszczenia  $2 \text{ mm/min}$ , natomiast dwuosiowe w stosunku sił 1-1 z prędkością  $100 \text{ N/s}$ .

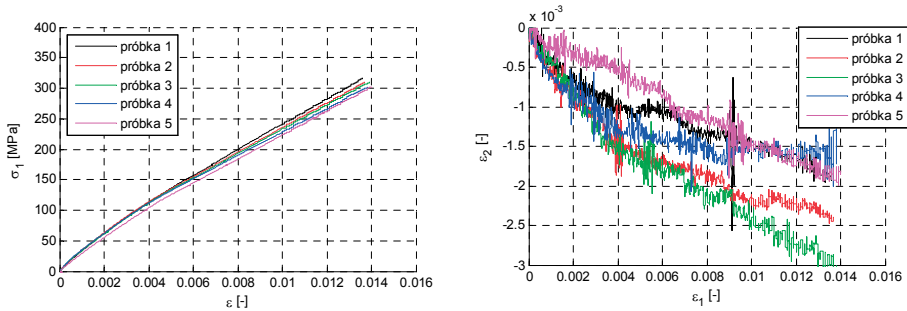
Wyniki testów rozciągania jednoosiowego dla pięciu próbek dociętych wzdłuż włókien szklanych przedstawiono na rys. 5. Wynik testu rozciągania dwuosiowego przedstawiono na rys. 6. We wszystkich zaprezentowanych testach maksymalna siła osiągalna na urządzeniu była mniejsza od siły niszczącej próbki. Testy zakończono dla końcowej wartości siły równej  $19,5 \text{ kN}$ .

Badania identyfikacyjne właściwości mechanicznych kompozytu wzmocnionego tkaniną szklaną E dwukierunkową, quasi-zrównoważoną, zszywaną, o gramaturze  $800 \text{ g/m}^2$ , stanowiącego warstwę laminatu okładek dźwigara przekładkowego kładki, przeprowadzono

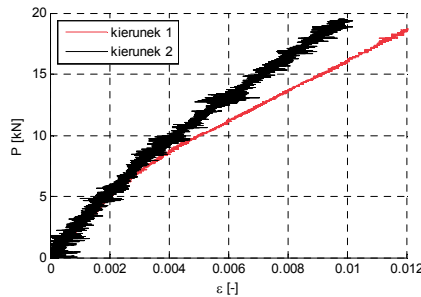
w Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej. Badania te obejmowały kompozyt nowy i starzony (cykl przyspieszonego starzenia odpowiadający okresowi eksploatacji 5 lat) w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $55^{\circ}\text{C}$ . Opis i wyniki badań zostaną opublikowane w oddzielnej pracy.



Rys. 4. Próbkę okładzin w teście jednoosiowym (po lewej) i dwuosiowym (po prawej)



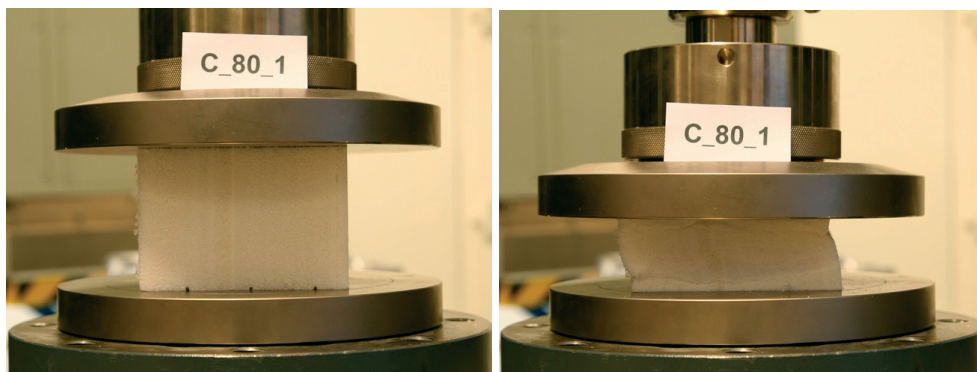
Rys. 5. Wyniki rozciągania jednoosiowego próbek z laminatu wzmocnionego tkaniną szklaną E dwukierunkową, quasi-zrównoważoną, zszywaną



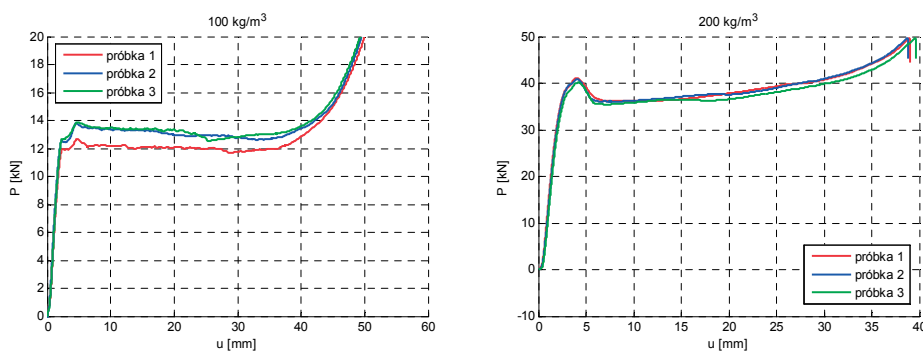
Rys. 6. Wynik rozciągania dwuosiowego próbek z laminatu wzmocnionego tkaniną szklaną E dwukierunkową, quasi-zrównoważoną, zszywaną

### 3.2. Badania pianki PET

Badania ściskania jednoosiowego wykonano na próbkach prostokątnych o wymiarach  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 70\text{ mm}$  wykonanych z pianki PET o gęstości  $80\text{ kg/m}^3$ ,  $100\text{ kg/m}^3$  oraz  $200\text{ kg/m}^3$ . Ściskanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z400 z prędkością  $5\text{ mm/min}$  (rys. 7). Wyniki próby ściskania dla próbek o gęstości  $100\text{ kg/m}^3$  oraz  $200\text{ kg/m}^3$  pokazane są na rys. 8. Każde z badań powtórzono na trzech próbkach. Widoczna jest zgodność wyników ściskania dla poszczególnych próbek.



Rys. 7. Próbkę z pianki PET poddanej ścisaniu jednoosiowemu

Rys. 8. Wyniki ścisania jednoosiowego próbek o gęstości  $100 \text{ kg/m}^3$  oraz  $200 \text{ kg/m}^3$ 

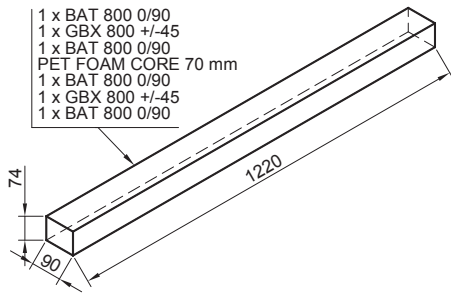
### 3.3. Zginanie belek z kompozytu przekładkowego

Próby zginania wykonano na belkach o długości 1220 mm i przekroju  $90 \text{ mm} \times 74 \text{ mm}$  (rys. 9) [4]. Badaniu poddano 6 belek (B1 do B6), do wykonania których użyto trzech gęstości pianek PET tworzących rdzeń:  $80 \text{ kg/m}^3$  (belki B1 oraz B4),  $100 \text{ kg/m}^3$  (belki B2 oraz B5) i  $200 \text{ kg/m}^3$  (belki B3 oraz B6). Belki poddano zginaniu 3-punktowemu (belki B1, B2, B3) oraz 4-punktowemu (belki B4, B5, B6). Zginanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z400 z prędkością przemieszczenia  $2 \text{ mm/min}$ . Przemieszczenie pionowe belki mierzono za pomocą czujnika indukcyjnego, zaś odkształcenia przy użyciu tensometrów elektrooporowych, rozmieszczonych jak na rys. 10.

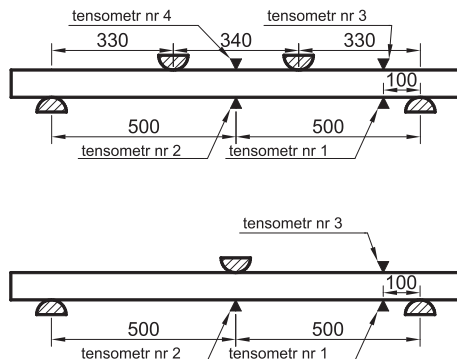
Rysunek 11 pokazuje zależność siły od przemieszczenia dla wszystkich testowanych belek. Maksymalna siła przy zginaniu 3-punktowym wyniosła  $9,98 \text{ kN}$ , zaś przy zginaniu 4-punktowym  $17,1 \text{ kN}$ . Wszystkie próbki zostały zniszczone w trakcie testów. Na rys. 12, 13 widoczne są odkształcenia pomierzone przy zginaniu 3- i 4-punktowym. Można zauważyć, że przy zginaniu 4-punktowym odkształcenia w strefie przypodporowej zmieniały się w zależności od gęstości rdzenia, natomiast wpływ gęstości pianki na krzywe siła-odkształcenie pomierzone w środku belki był mniejszy. Odwrotną tendencję zaobserwowano przy zginaniu 3-punktowym (rys. 13).

Rysunek 14 przedstawia postacie zniszczenia belek o różnej gęstości rdzenia, w zginaniu 3-punktowym. Przy najniższej gęstości pianki ( $80 \text{ kg/m}^3$ ) zniszczenie nastąpiło na skutek ścięcia pianki, co spowodowało odspojenie okładziny od rdzenia. W przypadku pianki o największej gęstości ( $200 \text{ kg/m}^3$ ) zniszczenie nastąpiło na skutek wybożenia

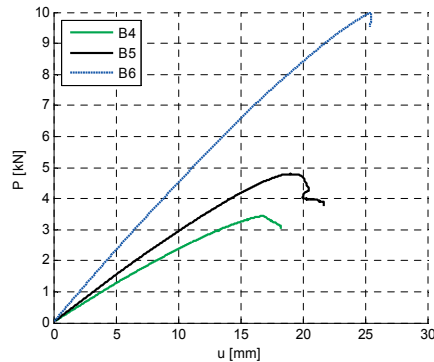
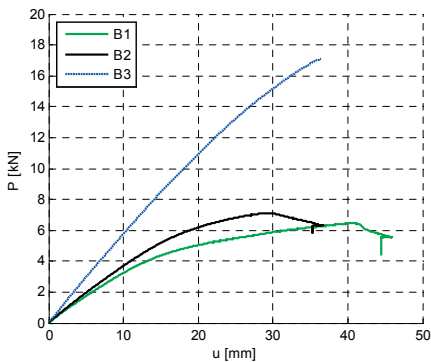
okładziny w pobliżu miejsca przyłożenia obciążenia. W przypadku pianki o gęstości  $100 \text{ kg/m}^3$  mechanizm niszczenia jest podobny jak w przypadku gęstości  $80 \text{ kg/m}^3$ , jednak odspojenie okładziny jest znacznie mniejsze.



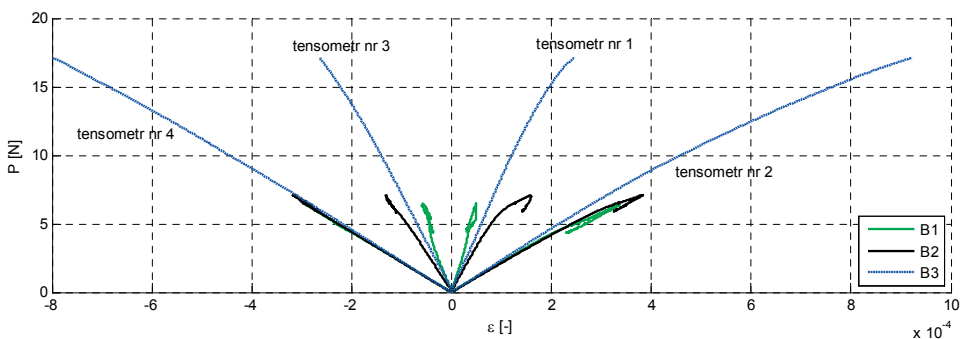
Rys. 9. Geometria belek



Rys. 10. Stanowiska dla zginania 4- oraz 3-punktowego

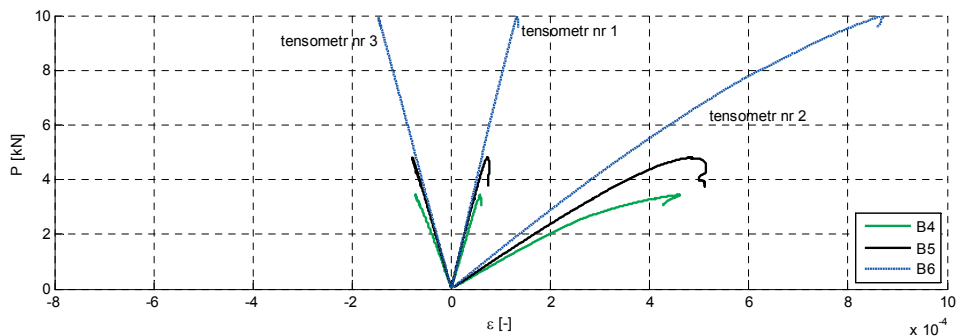


Rys. 11. Zależność siła-przemieszczenie przy zginaniu 4-punktowym (po lewej) oraz 3-punktowym (po prawej)

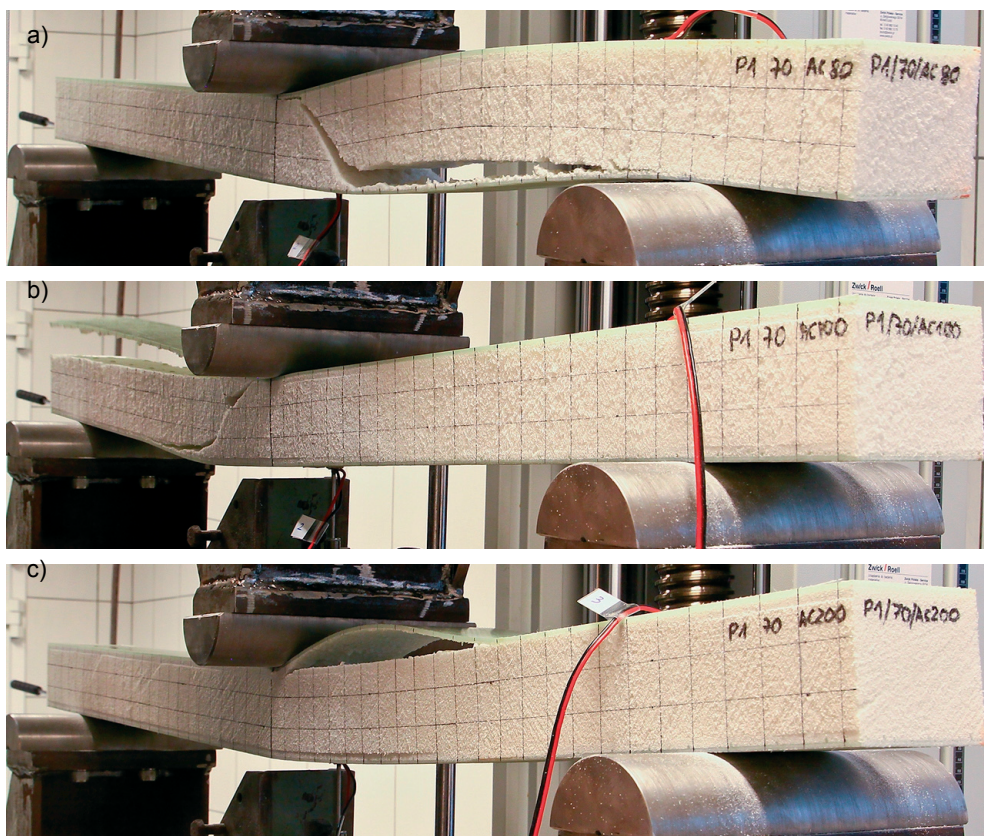


Rys. 12. Zależność siła-odkształcenie przy zginaniu 4-punktowym





Rys. 13. Zależność siła-odkształcenie przy zginaniu 3-punktowym



Rys. 14. Postacie zniszczenia belek przy zginaniu 3-punktowym: a) belka B4; b) belka B5; c) belka B6

#### 4. Uwagi końcowe

Materiał przekładkowy wykonany z okładzin kompozytowych wzmocnionych tkaniną szklaną i rdzenia z pianki PET ma wiele zalet, z których najważniejszą jest relatywnie mały ciężar i duża sztywność. Most sandwiczowy może być wyprodukowany w technologii infuzji zaledwie w kilka dni, a jego ważną cechą ma być konkurencyjna cena.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań doświadczalnych okładzin, pianki PET i belek wykonanych z materiału przekładkowego. Uzyskane wyniki stanowią dane

walidacyjne do modeli numerycznych kładki, na potrzeby jej projektowania. W przeprowadzonych badaniach 3- i 4-punktowego zginania kompozyt przekładkowy uległ zniszczeniu w wyniku delaminacji okładzin lub zniszczenia pianki rdzenia.

## Podziękowania

Praca została wykonana w ramach konkursu PBS1 NCBiR pt. „Opracowanie kompozytowych przęseł mostów dla pieszych do zastosowania nad drogami GP” (Umowa PBS1/B2/6/2013, realizacja w latach 2013-2015). Autorzy wyrażają podziękowanie dr. hab. inż. Tomaszowi Mikulskiemu, dr. hab. inż. Wojciechowi Witkowskiemu, mgr. inż. Karolowi Daszkiewiczowi, mgr. inż. Tomaszowi Ferencowi i mgr. inż. Bartoszowi Sobczykowi za ich znaczący wkład w wykonanie badań doświadczalnych.

## Literatura

- 1 Potyrała P.B., Rius J.R.C. Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures. Escola Tecnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament Enginyeria de la Construcció, 2011.
- 2 Chrościelewski J., Kłasztorny M., Miśkiewicz M., Romanowski R., Wilde K. Innovative design of GFRP sandwich footbridge, Proceedings of Int. Conf. Footbridges: Past, Present & Future FOOTBRIDGE-2014, 16-18 July 2014, London, England.
- 3 Rochman-Drochomirecka K., Białkowski M., Drohomirecki J. Koncepcje architektoniczne mostu dla pieszych w ramach projektu FOBRIDGE. Raport okresowy, Gdańsk, 2013.
- 4 Chróścielewski J., Pyrzowski Ł., Romanowski R. and Rucka M. Experimental tests of sandwich beam in the design process of GFRP shell footbridge structure, Proceedings of Int. Conf. Footbridges: Past, Present & Future FOOTBRIDGE-2014, 16-18 July 2014, London, England.

## GFRP sandwich composite with PET core in shell structure of footbridge

**Jacek Chróścielewski<sup>1</sup>, Marian Kłasztorny<sup>2</sup>, Mikołaj Miśkiewicz<sup>1</sup>,  
Łukasz Pyrzowski<sup>1</sup>, Magdalena Rucka<sup>1</sup>, Krzysztof Wilde<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Gdansk University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering,  
e-mail: jchrost@pg.gda.pl, lpyrzow@pg.gda.pl, mmisk@pg.gda.pl, mrucka@pg.gda.pl,  
wild@pg.gda.pl*

<sup>2</sup> *Military University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering,  
e-mail: mklasztorny@wat.edu.pl*

**Abstract:** The paper presents experimental study of sandwich composite used for an innovative foot-and-cycle bridge. The footbridge has a U-shaped shell structure made of sandwich consisting GFRP laminate covers and foam PET core. The bridge is manufactured using the infusion technology. Results of one and two directional tension tests of the laminates, compression tests of PET foam samples and 3-point as well as 4-point bending tests of sandwich beams are presented.

**Keywords:** footbridge, sandwich, GFRP covers, PET foam core, infusion technology.