



MACIEJ KULPA

Politechnika Rzeszowska
kulpa@prz.edu.pl
ORCID: 0000-0002-8550-7382

Weryfikacja systemu monitoringu konstrukcji kompozytowych wykorzystującego czujniki światłowodowe DFOS

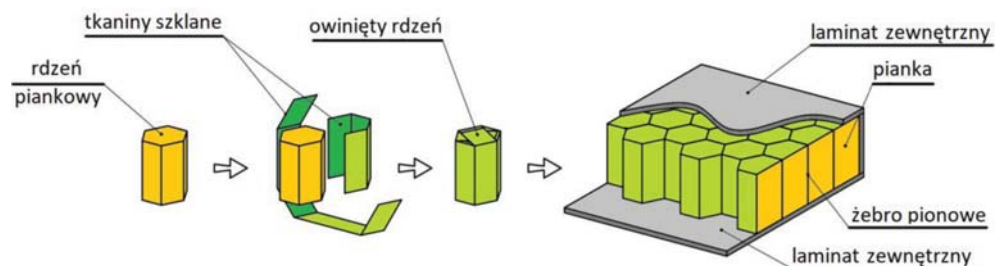
W wyniku bezpośredniego obciążenia kołami pojazdów oraz destrukcyjnego oddziaływania środowiska, konwencjonalna, żelbetowa płyta pomostu jest jednym z najmniej trwałych elementów drogowego obiektu mostowego. Odpowiedzią na ten trend są opracowywane w ostatnich kilkudziesięciu latach rozwiązania materiałowe i konstrukcyjne, które mają za zadanie wydłużyć trwałość konwencjonalnych płyt pomostowych [1]. Jednym z rozwiązań są rozpowszechnione w ostatnich latach panele pomostowe z kompozytów polimerowych FRP (z ang. *fibre reinforced polymers*) [2, 3]. Powszechną praktyką przed wdrożeniem pomostów FRP była weryfikacja ich docelowych cech użytkowych, takich jak sztywność czy nośność, często w warunkach laboratoryjnych. Niezależnie od badań na etapie koncepcyjnym, pomosty FRP były zwykle badane podczas ich późniejszej eksploatacji za pomocą różnych systemów monitoringu. Miało to na celu zarówno weryfikację nośności i trwałości pionierskiego rozwiązania, jak również zdobycie nowej wiedzy dotyczącej zachowania się pomostów FRP. Wśród wielu technik pomiarowych i technologii monitoringu największe nadzieje budzi obecnie technologia światłowodowa [4].

W pracy przedstawiono nowy system paneli pomostowych wykonywanych z kompozytów FRP, przeznaczony do zastosowań w mostach drogowych [5]. Jego cechą wyróżniającą, oprócz innowacyjnego rozwiązania materiałowego i konstrukcyjnego, jest również zintegrowany system monitoringu, wykorzystujący czujniki światłowodowe DFOS (z ang. *distributed fibre optic sensors*), umożliwiające ciągły geometryczny pomiar odkształceń. W dalszej części pracy przedstawiono weryfikację doświadczalną systemu monitoringu światłowodowego DFOS zintegrowanego z panelem pomostu FRP i wnioski z niej płynące.

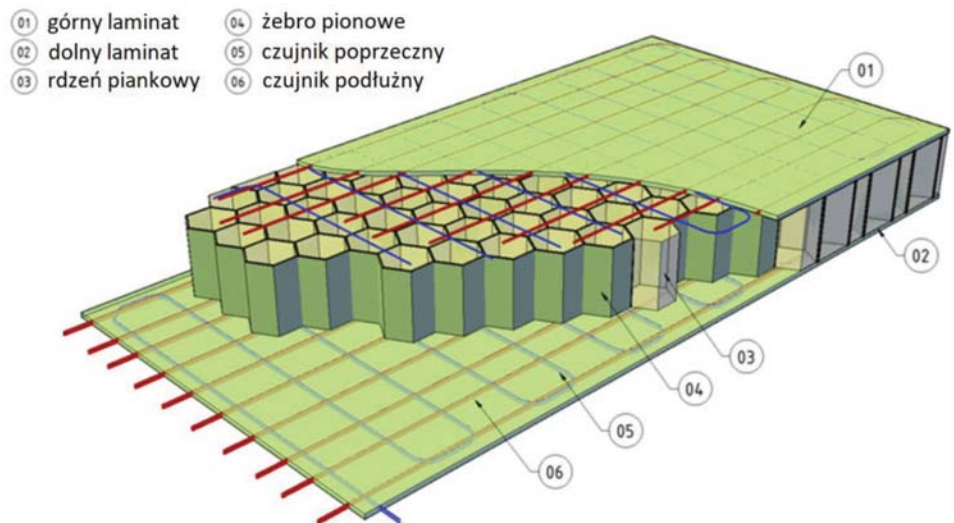
Kompozytowy panel pomostu z systemem DFOS

Nowy panel pomostu charakteryzuje się budową warstwową (tzw. *sandwich*) i składają się na niego sztywne, płaskie okładziny zewnętrzne z laminatów (kompozytu) FRP oraz rdzeń piankowy. Bezpośrednie obciążenie panelu naciskami od kół pojazdów wymusza uźebrowanie rdzenia, które jest odpowiedzialne za rozkład obciążeń oraz przeniesienie ścinania podłużnego pomiędzy zewnętrznymi okładzinami. W tym przypadku zdecydowano się na uźebrowanie pionowymi laminatami, tworzącymi strukturę plastra miodu [6].

Słabym punktem każdej płyty warstwowej jest połączenie pomiędzy zewnętrznymi okładzinami a rdzeniem – w tym przypadku pionowymi laminatami uźebrowania. W celu za-



Rys. 1. Schemat produkcji i budowy projektowanego panelu pomostu



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia czujników światłowodowych wewnątrz panelu pomostu

pewnienia jak najbardziej sztywnego i wytrzymałego połączenia okładzin i żeber rdzenia opracowano indywidualną technologię produkcji, polegającą na owijaniu prefabrykowanych graniastostupów piankowych suchymi tkaninami, a następnie ułożeniu ich w formie płyty. Docelowe uźebrowanie rdzenia tworzy się w trakcie infuzji żywicy, a przyjęty sposób owinięcia zapewnia ciągłość włókien przechodzących z powierzchni pionowych na poziome (rys. 1).

Opracowany panel pomostu jest wyposażony w system monitoringu z wykorzystaniem wbudowanych w jego strukturę ciągłych czujników światłowodowych (rys. 2). Zalety rozproszonych czujników światłowodowych DFOS są dobrze znane i wykorzystywane w wielu zastosowaniach inżynierii lądowej [7, 8]. Jednak potencjalne korzyści z ich stosowania w monitoringu wciąż nie są w pełni wykorzystywane. Dzięki ciągłym światłowodom można monitorować zachowanie panelu praktycznie na całej jego powierzchni, a nie tylko w wybranych punktach, jak ma to miejsce w przypadku konwencjonalnych (dyskretnych) systemów (np. czujniki tensometryczne lub strunowe). W przypadku czujników punktowych pomiar wykonywany jest tylko w kilku wybranych punktach konstrukcji. W przypadku lokalnego rozwoju uszkodzeń (co jest często spotykane w przypadku konstrukcji kompozytowych), pomiar punktowy jest często bezużyteczny – informację o uszkodzeniu uzyskuje się, gdy uszkodzenie jest już w zaawansowanym stadium, często widoczne gołym okiem. Ponadto umieszczenie światłowodów wewnątrz laminatów panelu eliminuje ryzyko ich uszkodzenia lub odspojenia się od konstrukcji podczas transportu lub w trakcie eksploatacji. Jednocześnie zbieranie informacji z wnętrza laminatu pozwala na identyfikację potencjalnych karbów, w których mogą się rozwijać mikrouszkodzenia propagujące przez poszczególne laminy wewnątrz materiału.

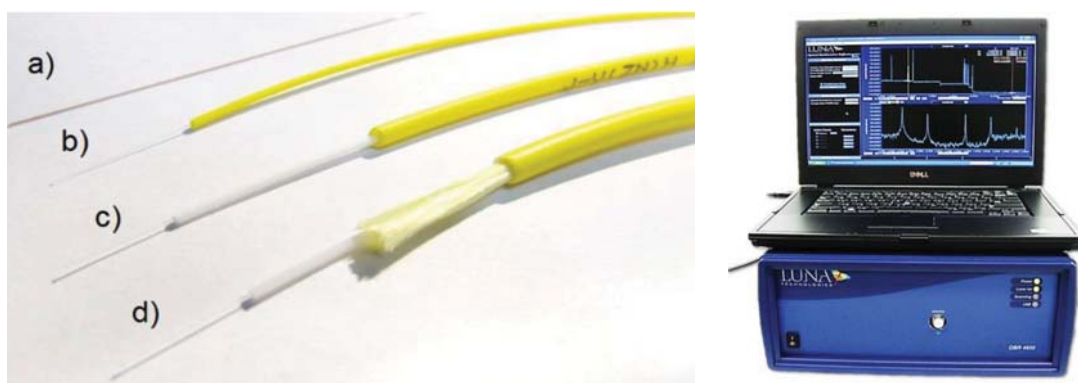
Dodatkowo, dzięki zastosowaniu pomiarów ciągłych geometrycznie, panel może wykrywać

w czasie rzeczywistym sytuacje wyjątkowe i niebezpieczne, takie jak przejazd przeciążonego pojazdu, powodujący przyspieszoną degradację obiektów mostowych. Na podstawie zebranych z systemu wyników może on także dokonywać autodiagnostyki w trakcie eksploatacji. Możliwość zastosowania pomiarów ciągłych w dłuższym okresie ma jeszcze jedną zaletę – pozwala na uzyskanie rzeczywistego widma naprężeń, które można powiązać z ciężarami poruszającymi się po panelu pojazdów oraz nośnością zmęczeniową.

Badania materiałowe i weryfikacja systemu DFOS

W pierwszym etapie prac nad nowym systemem pomostu wykonano szeroko zakrojone badania materiałowe, które były podstawą do przyjęcia wartości stałych opisujących materiał w czasie prac koncepcyjnych i projektowych. Wykorzystano produkcję i badania próbek materiałowych, jako sposobność do przetestowania koncepcji umieszczenia czujników światłowodowych wewnątrz laminatów, jeszcze na etapie produkcji. Kompleksowe badania materiałowe obejmowały kilkaset próbek, mierzonych zarówno klasycznymi technikami pomiarowymi z użyciem tensometrii elektrooporowej i pomiarów optycznych, jak również za pomocą czujników światłowodowych, umieszczonych wewnątrz kilkudziesięciu próbek [4, 9].

Do pomiarów zastosowano standardowy, jednomodowy światłowod telekomunikacyjny 9/125 o średnicy rdzenia



Rys. 3. Po lewej: kolejne Widok światłowodów telekomunikacyjnych w powłokach a) akrylowej ($< 250 \mu\text{m}$), b) ochronnej $900 \mu\text{m}$, c) ochronnej 2 mm , d) ochronnej 3 mm zbrojonej włóknem kevlarowym; po prawej: Reflektometr optyczny OBR4600 produkcji LUNA Innovations [www.lunainc.com]



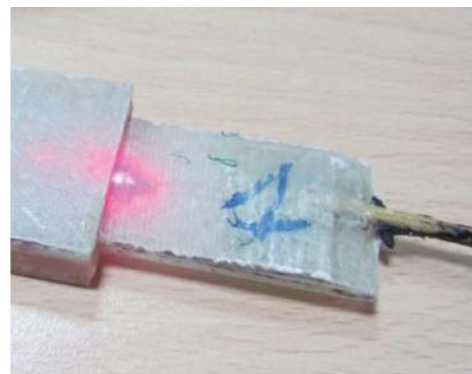
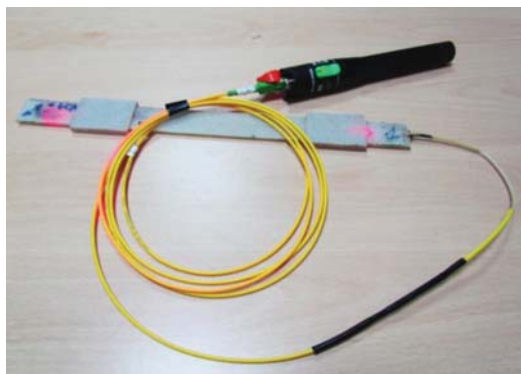
Rys. 4. Po lewej: widok gotowych próbek materiałowych; po prawej: zbliżenie na wyprowadzenie światłowodów poza obrzys próbki

9 μm , otoczonego akrylową powłoką ochronną o średnicy 125 μm . Włókno światłowodowe było umieszczane pomiędzy wskazanymi tkaninami laminatów bez innych, zwyczajowo stosowanych powłok ochronnych. W miejscach wyprowadzeń czujników poza obrys laminatu stosowano dodatkowe, kilkuwarstwowe wzmocnienie włókna zwiększające jego średnicę do 3 mm (rys. 3a).

Pomiary odkształceń były realizowane z wykorzystaniem reflektometru optycznego OBR 4600 produkcji LUNA Innovations (USA). Urządzenie to, wykorzystujące zjawisko rozpraszania Rayleigha, jest dedykowane do pomiarów DFOS z niezwykle niską rozdzielczością przestrzenną do 5 mm (rys. 3b).

Jednym z technologicznych wyzwań była produkcja próbek (laminatów) o grubości ok. 2 mm z jednoczesnym umieszczeniem wewnątrz światłowodów oraz innych elementów trasy pomiarowej DFOS, takich jak odcinki przejściowe, spawy oraz specjalne zakończenia tras. Wymagało to wydłużenia próbek w stosunku do typowych długości próbek materiałowych i ukształtowania odcinka poza strefą mocowania w maszynie wytrzymałościowej, na długości którego umieszczono spawy światłowodu oraz poszerzenia związane z wyprowadzeniem czujnika z litego laminatu (rys. 4).

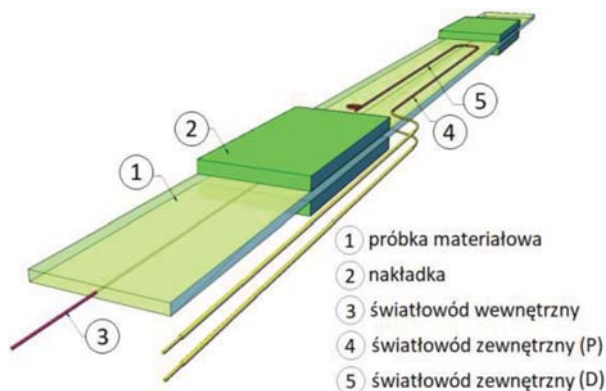
Na długości odcinka pomiarowego czujnik światłowodowy miał średnicę zaledwie 125 μm , co wiązało się z ryzykiem jego uszkodzenia w trakcie procesów produkcji, w tym działania podciśnienia w czasie infuzji. Dlatego na każdym etapie produkcji kontrolowano ciągłość czujnika światłowodowego z użyciem laserowego lokalizatora uszkodzeń (rys. 5). Żaden światłowod (trasa pomiarowa) nie został uszkodzony w czasie produkcji próbek. W miejscach niewralgicznych, takich jak strefy spawów, można było zaobserwować w czujniku DFOS karby, jednak nie były one na tyle znaczące, aby ograniczyć lub zakłócić prowadzenie pomiarów za ich pomocą.



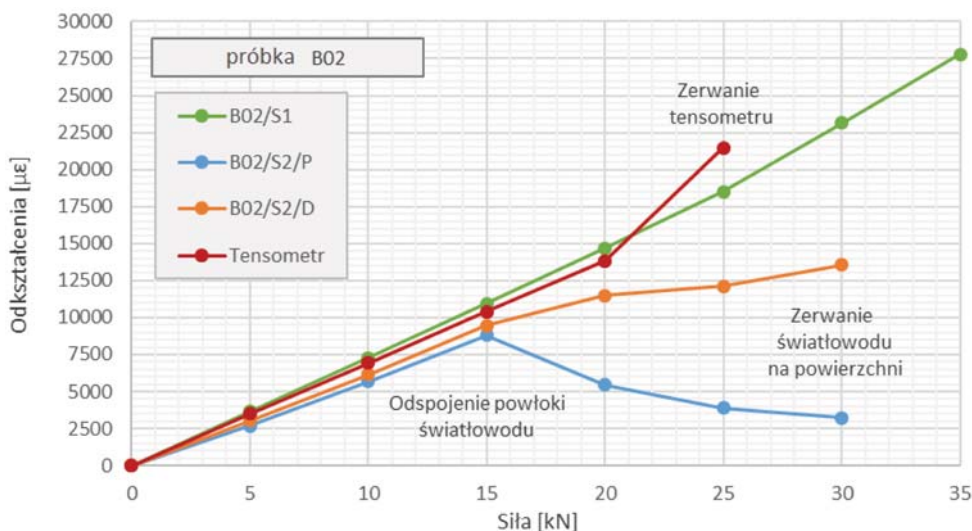
Rys. 5. Po lewej: widok przykładowej próbki sprawdzanej za pomocą lokalizatora laserowego; po prawej: przykład niepożądanych efektów związanych z występującymi karbami na krawędzi nakładki w obrębie wprowadzenia włókien w osłonki wysokotemperaturowe

Wraz z czujnikami umieszczonymi wewnątrz laminatów, na zewnętrznych powierzchniach próbek umieszczono dodatkowe światłowody (trasy pomiarowe) zarówno w osi próbki, jak i w pobliżu jej krawędzi (rys. 6a). Dzięki temu było możliwe nie tylko porównanie niezawodności obu rodzajów lokalizacji czujników (wewnątrz i na zewnątrz laminatu), ale także kompleksowa ocena zachowania próbki pod obciążeniem wraz z uwzględnieniem ewentualnych momentów zginających wywołanych nieosiowym zamocowaniem w maszynie wytrzymałościowej oraz nieuniknionymi imperfekcjami wykonawczymi próbek. Czujniki przyklejane do zewnętrznych powierzchni próbek zostały zamocowane w dwojaki sposób: na całej długości za pomocą kleju epoksydowego (oznaczenie D) oraz punktowo, na końcach odcinka pomiarowego, za pomocą kleju cyjano-akrylowego (oznaczenie P). W tym drugim przypadku tworzono czujnik quasi-strunowy.

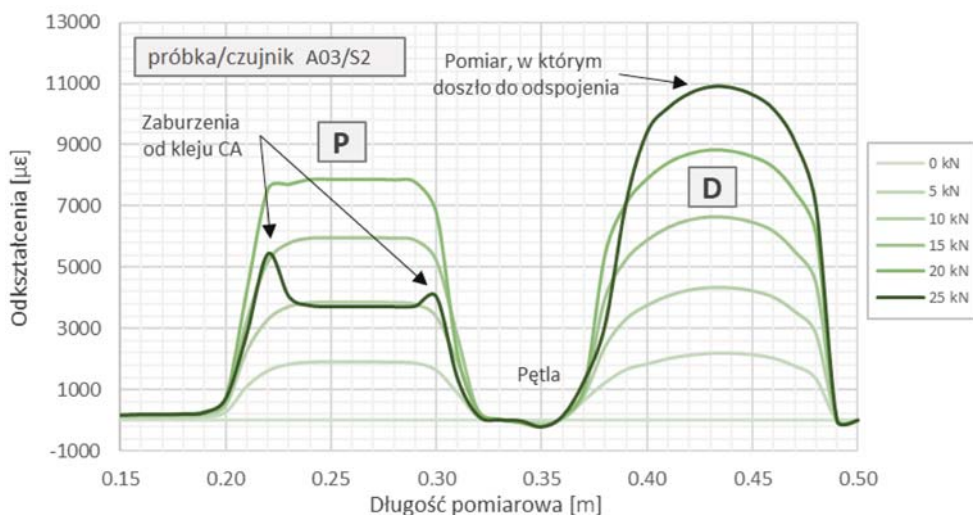
Badania osiowego rozciągania próbek laminatów zostały przeprowadzone w Wydziałowym Laboratorium Badań Konstrukcji Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej (rys. 6b). Ze względu na zastosowanie reflektometru wykonującego pomiary w sposób statyczny, proces rozciągania realizowano w sposób krokowy co 5 kN. Po uzyskaniu planowanej wartości siły obciążenie utrzymywano na zadanym poziomie na czas wykonania pomiarów światłowodowych. Czas ten zależał od liczby kanałów pomiarowych, odpowiadającej liczbie włó-



Rys. 6. Po lewej: wizualizacja przestrzenna tras pomiarowych światłowodu zainstalowanego wewnątrz próbek oraz na ich powierzchniach; po prawej: widok stanowiska do pomiarów światłowodowych w czasie badań osiowego rozciągania



Rys. 7. Wartości odkształceń w środku długości próbki B02 zmierzone światłowodem wewnątrz laminatu (S1), światłowodem przyklejonym do zewnętrznej powierzchni próbki na dwa sposoby (S2/P i S2/D) oraz referencyjnym tensometrem



Rys. 8. Rozkłady odkształceń na całej długości włókna światłowodowego S2 zamocowanego na dwa sposoby (P i D) do zewnętrznej powierzchni próbki A03

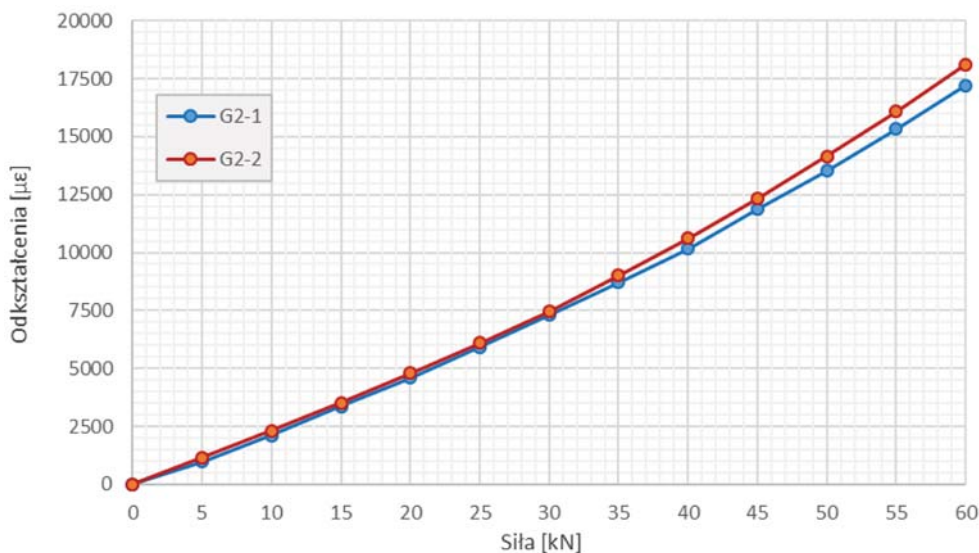


kien światłowodowych zainstalowanych w danej próbce i wynosił w przybliżeniu 10 sekund dla każdej trasy pomiarowej.

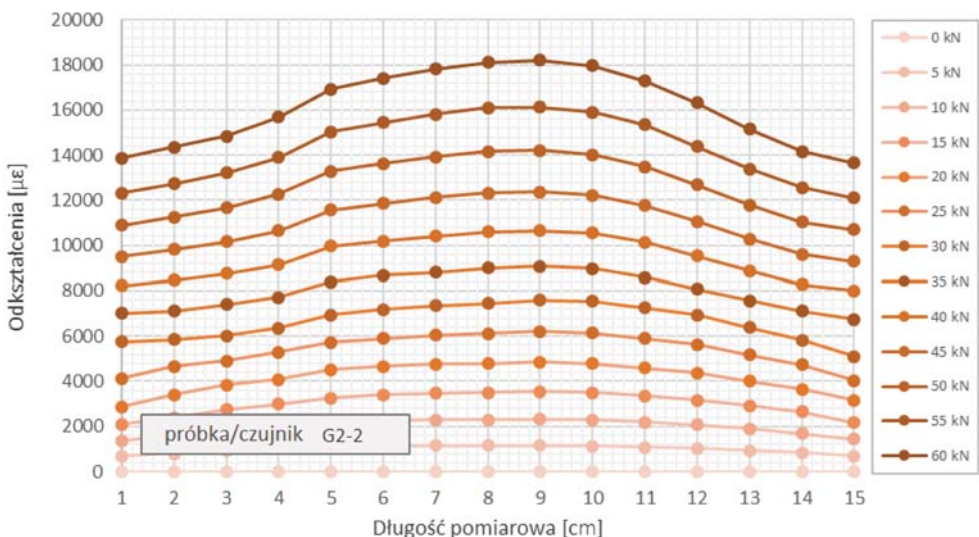
Czujniki przyklejone na zewnętrznych powierzchniach najczęściej ulegały uszkodzeniu jeszcze przed zniszczeniem samej próbki. Siła powodująca odspojenie czujników była zmienna i zawierała się w zakresie ok. 50–90% siły niszczącej samą próbkę. Przykładowe porównanie odczytów uzyskanych ze światłowodów wewnętrznych, zewnętrznych i referencyjnego tensometru elektrooporowego przedstawiono na rysunku 7. Różnice w pochyleniach krzywych wynikają z nieuniknionych karbów i imperfekcji geometrycznych, ale każdy czujnik zarejestrował sprężystą, liniową odpowiedź próbki na przyłożone obciążenie. Wyraźnie widać, że czujnik światłowodowy umieszczony wewnątrz próbki pozwalał na pomiary aż do momentu jej zniszczenia i dlatego można go uznać za najbardziej wiarygodny i niezawodny spośród wszystkich wykorzystanych czujników.

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe wyniki odkształceń uzyskane z odczytu czujnika zewnętrznego ułożonego w dwóch odcinkach pomiarowych (por. rys. 6a). Pierwsza część czujnika została przyklejona punktowo (P), a druga na całej długości (D). Można zauważyć, że w przypadku punktowego zamocowania czujnika odkształcenia na długości są stałe – co wynika z jego strunowej pracy, a wyniki odkształceń należy interpretować jako uśrednione z długości pomiędzy punktami zamocowania. W drugim przypadku, gdy czujnik jest przyklejony na całej długości, można zauważyć nierównomierny rozkład na długości próbki i rzeczywistą koncentrację odkształceń w jej środkowej części.

Rys. 9. Od lewej: widok przykładowej próbki wielowarstwowej o tzw. kształtce wiórkowej oraz różne postacie zniszczenia próbek wielowarstwowych



Rys. 10. Zależność pomiędzy siłą obciążającą a odkształceniami zmierzonymi przez włókna światłowodowe umieszczone wewnątrz próbek wielowarstwowych G2-1 i G2-2 w ich środkach rozpiętości



Rys. 11. Rozkład odkształceń na długości pomiarowej włókna światłowodowego umieszczonego wewnątrz próbki laminatów wielowarstwowych (G2-2) przy kolejnych poziomach obciążenia

Po zakończeniu podstawowych badań materiałowych na próbkach cienkowarstwowych wykonano również dodatkowe badania laminatów wielowarstwowych o docelowej budowie okładzin zewnętrznych panelu. Grubość tych laminatów wynosiła 13,4 mm a kształt próbek był wiósełkowy, zgodnie z normą [10] (rys. 9). Docelowy laminat okładzin składał się z 31 pojedynczych warstw tkanin (lamin) o zmiennej orientacji włókien. Takie zaburzenie ortotropowości kompozytu FRP powoduje, że składowe tensorów naprężeń w poszczególnych warstwach przybierają różne wartości, a co za tym idzie wyężenie poszczególnych warstw jest również zmienne w ramach jednego przekroju. W momencie, w którym dochodzi do pierwszych uszkodzeń najstarszych lamin, dochodzi do nieliniowej pracy całego laminatu. Można to zaobserwować na przykładowym wykresie zależności odkształcenia od przyłożonej siły obciążającej (rys. 10).

Umieszczenie ciągłego geometrycznie czujnika DFOS wewnątrz materiału umożliwia dokonanie oceny pracy kompozytu na całej długości próbki. Przy wyższych poziomach siły obciążającej można zaobserwować nierównomierny rozkład odkształceń na długości odcinka pomiarowego (rys. 11). Może to sygnalizować występowanie w laminacie wewnętrznych karbów, takich jak nieprzesycenia lub wtrącenia, których obecność zaburza rozkład odkształceń. Wykrycie takich wewnątrznych, często niewidocznych uszkodzeń, jest szczególnie istotne z punktu widzenia bezpiecznej pracy konstrukcji kompozytowych.

Wnioski i podsumowanie

Zastosowanie czujników pomiarowych w postaci włókna światłowodowego w powłoce akrylowej zintegrowanego z laminatem jest skuteczne w geometrycznie ciągłych pomiarach odkształceń kompozytu FRP, nawet w przypadku ekstremalnie dużych odkształceń przekraczających 2% (maksymalna zarejestrowana wartość odkształcenia wynosiła ponad 2,75% – rys. 6). Wystąpienie tak dużych wartości odkształceń w czasie rzeczywistej eksploatacji elementu kompozytowego jest jednak bardzo mało prawdopodobne. W momencie zniszczenia próbek sprawne pozostawały jedynie czujniki umieszczone wewnątrz laminatu.

Zastosowanie sztywnego kleju cyjano-akrylowego do punktowego klejenia zewnętrznych czujników światłowodowych może powodować uszkodzenie włókna pomiarowego inicjowane przez pęknięcie jego powłoki na krawędzi kleju przy poziomie odkształceń ok. 1%. Z kolei zastosowanie kleju epoksydowego na całej długości włókna może okazać się problematyczne przy wartościach odkształceń rzędu 1,5%, z uwagi na zjawiska odspajania się żywicy od powierzchni kompozytu lub jej pęknięcia [11]. W przypadku, gdy rozkład odkształceń na mierzonej długości pomiarowej może być zmienny, należy unikać punktowego klejenia. Na podstawie powyższych argumentów można stwierdzić, że integracja czujników światłowodowych z materiałem kompozytowym już na etapie jego produkcji jest najlepszym sposobem wiarygodnego pomiaru odkształceń kompozytu FRP. Ponadto takie rozwiązanie stanowi automatyczne i naturalne zabez-

pieczenie światłowodu przed przypadkowymi uszkodzeniami m.in. w czasie transportu elementów, budowy czy też docelowej eksploatacji konstrukcji.

Na podstawie uzyskanych wyników i doświadczeń z pionierskiej instalacji włókien światłowodowych wewnątrz kompozytu FRP stwierdzono, że korzystne, zasadne i możliwe jest zainstalowanie włókien światłowodowych w wybranych warstwach kompozytu w jednej płaszczyźnie (jeden nad drugim), a nie tylko w teoretycznej osi obojętnej przekroju próbki. Umieszczenie światłowodów na różnych poziomach laminatu daje szerszą informację o stanie poszczególnych jego lamin, które w przypadku laminatów wielowarstwowych mogą się od siebie znacząco różnić. Takie rozwiązanie może także znacznie rozszerzyć analizę pracy elementu kompozytowego o obliczenia jego rzeczywistej krzywizny. W przypadku docelowego panelu pomostowego oznacza to możliwość wyznaczania jego strzałki ugięcia na podstawie odkształceń zmierzonych na całej długości laminatu (na wybranych wysokościach przekroju poprzecznego laminatu).

Prezentowane prace były prowadzone w trakcie realizacji projektu „OptiDeck”, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu Lider IX (LIDER/17/0070/L-9/17/NCBR/2018)

Bibliografia

[1] Siwowski T., Pomosty drogowe. Część I - Magazyn Autostrady, nr 10/2006, wydanie specjalne – jesień 2006, pn.: Mosty – konstrukcja, wyposażenie, utrzymanie, s. 30-38, część II - Magazyn Autostrady, nr 11/2006, s. 67-72.

- [2] Kulpa M., Siwowski T. Kształtowanie płyt pomostów mostów drogowych z kompozytów FRP. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury / Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture JCEEA, tom XXXII, zeszyt 62 (nr 3/II/2015), lipiec-wrzesień 2015, s.279-300.
- [3] Siwowski T., Kulpa M., Rajchel M., Advances in FRP composite vehicle bridges-the polish experience. Archives of Civil Engineering. 2020, vol. 66(1), s. 209-224.
- [4] Kulpa M., Howiacki T., Wiater A., Siwoski T., Sieńko R., Strain and displacement measurement based on distributed fibre optic sensing (DFOS) system integrated with FRP composite sandwich panel. Measurement, 2021, Vol. 175, 109099,
- [5] Kulpa M., Rajchel M., Siwowski T., Concept and Preliminary Test of the Intelligent FRP Bridge Deck for the Vehicular Bridges. Proc. 10th Int. Conf. on Fibre-Reinforced Polymer Composites in Civil Engineering. Springer, Cham., 2021; s. 89-100.
- [6] Davalos J.F., Chen A., Qiao P., FRP deck and steel girder bridge systems: analysis and design. CRC Press, 2013.
- [7] Lopez-Higuera J.M., Rodriguez L., Quintela A., Cobo A., Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring. Journal of Lightwave Technology 2011, 29(4), s. 587-608.
- [8] Barrias A., Casas J.R., Villalba S., A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. Sensors, 2016, 16.5: 748.
- [9] Kulpa M., Wiater A., Rajchel M., Siwowski T., Comparison of material properties of multilayered laminates determined by testing and micromechanics. Materials. 2021, 14, 761.
- [10] ASTM D838. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics; American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA, 2014.
- [11] Schilder C., Schukar M., Steffen M., Krebber K., Structural Health Monitoring of Composite Structures by Distributed Fibre Optic Sensors. Proc. 5th Int. Symposium on NDT in Aerospace, Singapore, 2013.

Zapraszamy do prenumerowania DROGOWNICTWA w 2024 roku

prenumerata roczna normalna 300 zł } (w tym 8% VAT)
cena 1 egzemplarza 26 zł }

prenumerata roczna studencka 150 zł } (w tym 8% VAT)
cena 1 egzemplarza 13 zł }

Uprzejmie informujemy Szanownych Prenumeratorów, że egzemplarze „Drogownictwa” oraz faktury będą wysyłane po przesłaniu zamówienia na adres prenumerata.drogownictwo@sitkrp.org.pl oraz po wpłaceniu należnej kwoty na nasze konto:

07 1240 6973 1111 0011 0889 5231

Wydawnictwa SITK RP sp. z o.o., ul. Świętokrzyska 14A lok. 150, 00-050 Warszawa

Redakcja