

mgr inż. Bartosz Sobczyk<sup>1)</sup>  
dr inż. Mikołaj Miśkiewicz<sup>1)\*</sup>

# Laminaty FRP w budownictwie – charakterystyka materiału i aspekty projektowania

*FRP laminates in civil engineering – material specification and design aspects*

DOI: 10.15199/33.2015.04.21

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono charakterystykę laminatów polimerowych wzmacnianych włóknami. W pierwszej części zaprezentowano teoretyczne modele materiałowe, podstawowe zależności naprężenie-odkształcenie włókien, matrycy oraz laminatu powstałego przez połączenie obydwu składników. Na tej podstawie sformułowano zalecenia dotyczące praktycznego wykorzystania laminatu w kontekście jego wytyżenia w projektowaniu elementów konstrukcyjnych. W drugiej części omówiono metody szacowania nośności kompozytów włóknistych z matrycą polimerową w kontekście metod zniszczenia: pierwszego (ang. *First Ply Failure – FPF*) i ostatniego włókna (ang. *Last Ply Failure – LPF*) oraz związane z nimi wybrane kryteria inicjacji zniszczenia.

**Słowa kluczowe:** laminaty polimerowe wzmocnione włóknami (FRP); nośność laminatów; kryteria inicjacji zniszczenia.

**Abstract.** The article presents some characteristics of fibre reinforced polymer laminates. In the first part theoretical material models are presented. Especially, basic stress-strain relations for fibres, matrix and fibre reinforced polymer laminates are shown and described. On the basis of these relations some recommendations are formulated, concerning the practical range of material effort in the field of structural design. In the second part of the article load capacity estimation methods of fibre reinforced polymer laminates are presented. Selected failure initiation criteria are described together with First and Last Ply Failure estimation methods.

**Keywords:** fibre reinforced polymer laminates (FRP); laminates load capacity; failure initiation criteria.

Laminaty znajdują zastosowanie w wielu obszarach przemysłu (okrętowy, lotniczy, sportowy, medyczny, motoryzacyjny), ale w budownictwie wciąż nie są zbyt powszechne [1]. Stosuje się je głównie jako elementy wzmacniające (taśmy, okładziny [2], domieszki do betonu) czy tymczasowe. Pomimo tego można zaobserwować tendencję do aplikacji laminatów zbrojonych włóknami do całych konstrukcji nośnych, np. na świecie [4, 5, 6] czy w Polsce [7, 8, 9]. Szacuje się, że aktualnie istnieje już około 1000 obiektów, w których zastosowano GFRP (kompozyt z włóknami szklanymi i polimerową osnową, ang. *Glass Fibre Reinforced Polymer*). Liczba ta stale się zwiększa, co świadczy o aktualności zagadnienia i potrzebie wdrażania nowych rozwiązań umożliwiających ich projektowanie i bezpieczne użytkowanie.

Artykuł ma na celu scharakteryzowanie cech materiałowych kompozytów włóknistych z polimerowymi matrycami i związanej z tym problematyki projektowej (określenie nośności) w zagadnieniach inżynierii lądowej.

## Charakterystyka pracy laminatów polimerowych wzmacnianych włóknami (FRP)

Laminat polimerowy wzmacniany włóknem składa się z warstw zbrojenia zatopionego w żywicy, zwanej matrycą [1, 10]. Jako zbrojenie najczęściej wykorzystuje się tkaniny techniczne z włókien (np. grafitowych, szklanych, aramidowych, a czasami mieszanych) o dużej wytrzymałości na rozciąganie, które mogą być układane pod różnymi kątami w płaszczyźnie warstwy, tworząc na jej poziomie materiał anizotropowy. Odpowiednie kształtowanie orientacji zbrojenia w odniesieniu do pełnej sekwencji laminacji pozwala na tworzenie elementów ortotropowych lub quasi-izotropowych. Tak zdefiniowany kompozyt łączy w sobie materiały o znacznie różniącej się sztywności

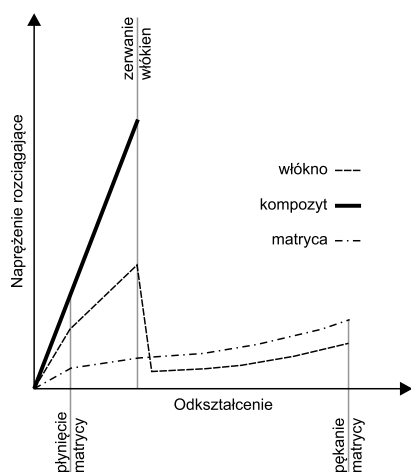
i wytrzymałości – z jednej strony sztywne, sprężyste i kruche włókna, z drugiej podatną matrycę [1]. Na rysunku 1 przedstawiono przykładową zależność naprężenie-odkształcenie oddzielnie dla włókien (zbrojenie) i żywicy (matryca) oraz wytworzonego z nich kompozytu. Dane uzyskano z próby rozciągania jednoosiowego [11, 12].

Efekt połączenia jest korzystny. Kompozyt może przenosić stosunkowo duże siły rozciągające przy jednoczesnej zdolności do pracy w innych stanach naprężenia (ściskanie, ścinanie, zginanie). Zadaniem matrycy polimerowej jest zapewnienie współpracy pomiędzy włóknami i dystrybucja obciążenia. Dodatkowo zapobiega ona wyboczeniu i przesuwaniu się włókien względem siebie, przeciwdziałając uszkodzeniom mechanicznym (np. uderzenia) czy spowodowanym oddziaływaniem środowiska [11].

Z rysunku 1 wynika, że z formalnego punktu widzenia nośność całego elementu wyczerpuje się, gdy matryca ulegnie zniszczeniu. Patrząc jednak pod kątem przydatności materiału

<sup>1)</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

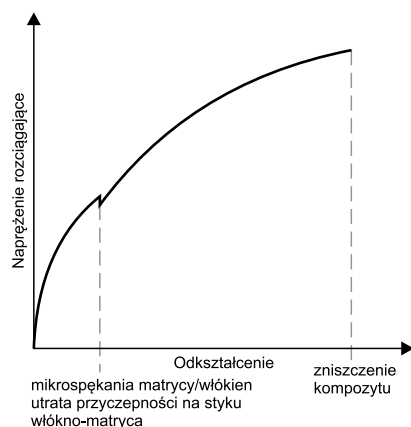
<sup>\*</sup> Adres do korespondencji:  
e-mail: mmisk@pg.gda.pl



Rys. 1. Zależność naprężenie-odkształcenie dla włókien, żywicy i kompozytu włókniściego, w próbie rozciągania [11, 12]

Fig. 1. Stress-strain relationship for fibres, resin and FRP composite in uniaxial tension test [11, 12]

w projektowaniu ustrojów budowlanych, należy zauważyć, iż wcześniej zerwaniu ulegają włókna (zbrojenie), a przez to następuje gwałtowna utrata nośności struktury, co w rzeczywistości może doprowadzić do awarii lub katastrofy. W związku z tym, przy projektowaniu konstrukcji kompozytowych należy brać pod uwagę jedynie zakres sprężystej pracy laminatu. Skutkuje to zastosowaniem sprężysto-kruchej teoretycznego modelu materiału. Co więcej, zanim zostanie osiągnięta nośność laminatu, w matrycy dochodzi do mikropęknięć i utraty przyczepności na styku włókno – matryca. Tego typu uszkodzenie nie jest jednoznaczne z gwałtownym spadkiem wytrzymałości (rysunek 2) [11]. Jednak w celu zapewnienia trwałości i niezawodności konstrukcji należy ograniczyć poziom naprężeń do zakresu wynikającego z pracy materiału w stanie nieuszkodzonym. W przypadku kruchej matrycy poliestrowej ze zbrojeniem z włókien szklanych, w formie przetykanego rowingu (ang. *woven roving*), mikropęknięcia następują przy odkształceniach 0,2%, podczas gdy nośność kruchosprężysta wyczerpuje się przy odkształceniach rzędu 2%. Oznacza to, że praktyczny zakres pracy materiału nieuszkodzonego jest znacząco ograniczony w stosunku do całkowitej nośności [11]. Przeprowadzone badania [13] wykazały, że dla laminatu na bazie żywicy winyloestrowych i szklanych, zszywanych, tkanin dwukierun-



Rys. 2. Zależność naprężenie-odkształcenia ilustrująca wpływ mikropęknięć matrycy/włókien oraz utraty przyczepności na styku włókno – matryca, na pracę laminatu [11]

Fig. 2. Stress-strain relationship, depicting the influence of microcracks and first fibre-resin debonding on the laminate behaviour [11]

kowych zakres pracy materiału nieuszkodzonego wynosi 23 – 27% całkowitej nośności próbek.

Reasumując, przy projektowaniu konstrukcji z laminatów polimerowych wzmocnianych włóknami należy zastosować model materiału kruchosprężystego. W związku z tym, że zbrojenie z włókien może być układane w różnym kierunku, laminaty traktuje się jako zbiór warstw ortotropowych (gdy użyte zostanie zbrojenie dwukierunkowe) lub poprzecznie izotropowych (dla zbrojenia jednokierunkowego). Dodatkowo maksymalne wyężenie konstrukcji powinno zostać ograniczone, w zależności od typu żywicy, do 10 – 20% nośności kruchosprężystej. Pozwoli to uniknąć powstawania mikropęknięć w materiale, które z czasem mogą niekorzystnie wpływać na pracę konstrukcji podczas eksploatacji.

### Nośność laminatu

Mając do czynienia z materiałem, którego właściwości nie są jednakowe we wszystkich kierunkach, należy zastosować specyficzne metody oceny nośności. Kryteria inicjacji zniszczenia mogą obejmować wszystkie warstwy struktury [14] lub określać zniszczenie w pojedynczej warstwie. Drugie podejście jest znacznie bardziej powszechne, co potwierdza liczba różnego rodzaju kryteriów inicjacji zniszczenia sformułowanych w odnie-

sieniu do pojedynczej warstwy kompozytu. Zgodnie z tą teorią możliwa jest analiza ewolucji uszkodzenia warstwy po warstwie. W laminatach można przyjąć, że powierzchnia zniszczenia elementu (w przestrzeni naprężeń lub odkształceń) opisana jest za pomocą kryterium inicjacji zniszczenia. Kryteria te są formułowane dla pojedynczej warstwy najczęściej przy założeniu stosowania zbrojenia jednokierunkowego, w odniesieniu do wartości naprężeń normalnych i stycznych oraz odpowiadających im wytrzymałości, związanych z osiami ortotropii, które w laminatach określa się mianem osi materiałowych [10]. W pracy [15] przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat inicjacji zniszczenia w laminatach, poparty bogatą bazą wyników eksperymentalnych. Dotychczas nie sformułowano uniwersalnego kryterium obejmującego wszystkie możliwe przypadki wyężenia laminatu. Dwa podstawowe odnoszące się do naprężeń, to kryterium maksymalnego naprężenia lub odkształcenia [10]. Nie uwzględniają one jednak wpływu złożonego stanu pracy elementu. Inne, bardziej zaawansowane podejścia definiowane są na podstawie pewnego wielomianu określającego powierzchnię zniszczenia, w którym ujęte są wszystkie składowe tensora naprężeń. W tej grupie można wyróżnić kryterium Tsai-Wu czy Tsai-Hilla [10]. Ostatnią istotną kategorię stanowią kryteria, w których uwzględnia się złożony stan pracy laminatów zarówno przez wpływ pewnych składowych tensora naprężeń, jak również przez wyróżnienie mechanizmu zniszczenia (zniszczenie włókien lub matrycy ze względu na rozciąganie czy ściskanie). W związku z tym kryteria te składają się z kilku wyrażeń. Przykładowe to kryteria Hashina [6] oraz Pucka [16]. To drugie uznawane jest za zaawansowane i bardzo nowoczesne [17].

W zależności od przyjętego kryterium i odpowiednich parametrów sterujących (jeżeli są wymagane, np. współczynnika interakcji, jak w kryterium Tsai-Wu [10]) uzyskuje się różne oszacowanie nośności. W związku z tym, przed przystąpieniem do projektowania i obliczeń konstrukcji z laminatów należy ocenić i wybrać kryterium najlepiej opisujące pracę stoso-

wanego materiału na podstawie własnych badań doświadczalnych [13] lub opublikowanych wyników eksperymentalnych [15]. Następnie należy wybrać metodę szacowania nośności globalnej konstrukcji. Dwie podstawowe metody odnoszą się do zniszczenia włókna – pierwszego (FPF, ang. *First Ply Failure*) lub ostatniego (LPF, ang. *Last Ply Failure*) [10]. Przyjmuje się, że nośność konstrukcji wyczerpuje się w momencie, w którym w dowolnym punkcie i w dowolnej warstwie laminatu zostanie osiągnięte kryterium inicjacji zniszczenia dla FPF, lub gdy zostaną zerwane ostatnie włókna dla LPF. Metoda LPF wymaga również określenia sposobu modelowania następującej degradacji materiału. Dostępnych jest wiele podejść, m.in. redukcja elementów macierzy sztywności warstwy związanej z zainicjowanym sposobem zniszczenia, obniżenie sztywności warstwy o stałą wartość po inicjacji zniszczenia lub stopniowe obniżenie sztywności warstwy w zależności od stopnia zniszczenia [18].

W praktyce w większości konstrukcji inżynierskich nie dopuszcza się do zarysowania. Zatem do szacowania nośności elementu konstrukcyjnego z laminatów proponuje się wykorzystywać metodę FPF, w której uwzględnia się tylko zakres pracy materiału nieuszkodzonego (nośność ograniczona do ok. 20% FPF). Takie podejście przedstawiono m.in. w [19]. Alternatywnie można wykorzystać normy z innych obszarów inżynierii, w których stosowanie kompozytów jest powszechne [20]. Wyznaczony w [20] graniczny wskaźnik wytrzymałości odpowiada momentowi, w którym w materiale dochodzi do mikrouszkodzeń.

### Podsumowanie i wnioski

Skomplikowana struktura kompozytów włóknistych wymaga zastosowania specyficznych procedur i metod, odbiegających od powszechnie znanych rozwiązań standardowych. Poruszane tutaj zagadnienia nie są uwzględnione w normach dotyczących projektowania konstrukcji budowlanych. Pomimo tego zalety laminatu wyraźnie przemawiają za jego wdrażaniem do budownictwa. Stosowanie tego typu materiałów jest korzystne w prefabrykacji kształtowni-

ków lub całych elementów konstrukcyjnych (rysunek 3). Umożliwia to skrócenie czasu wytworzenia konstrukcji oraz zapewnienie wysokich standardów wykonania. Obiekty z laminatów są lekkie, a ich utrzymanie stosunkowo tanie. Przy odpowiednich uwarunkowaniach konstrukcja z laminatów może stanowić korzystniejszą finansowo alternatywę do rozwiązań tradycyjnych, co w procesie inwestycyjnym jest obecnie czynnikiem decydującym.



**Rys. 3. Wizualizacja kładki realizowanej w ramach projektu FOBRIDGE jako pojedynczy element**

*Fig. 3. Visualization of foot-and-cycle bridge constructed in FOBRIDGE project as single element*

### Podziękowania

Artykuł powstał w ramach projektu nr PBS1/B2/6/2013, pt. *Opracowanie kompozytowych prześle mostów dla pieszych do zastosowania nad drogami GP współfinansowanego przez NCBiR realizowanego w latach 2013–2015*. Autorzy wyrażają podziękowanie za wsparcie finansowe. Bartosz Sobczyk jest objęty programem rozwoju młodej kadry Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej.

### Literatura

- [1] Campbell F. C.: *Structural Composite Materials*. ASM International, Materials Park Ohio, 2010.
- [2] Keller T., Schaumann E., Vallée T.: Flexural behavior of a hybrid FRP and lightweight concrete sandwich bridge deck. *Composites Part A (Applied Science and Manufacturing)*, vol. 38 (3), 2007, 879 – 889.
- [3] Calvo Herrera I., Primi S., Paulotto C., Lago Acero R., Areiza Hurtado M.: Diseño y fabricación de una pasarela de fibra de carbono sobre el río Manzanares. *Proceedings of VACHE International Conference on Bridge and Structures*. Barcelona (Spain) 25–27 October 2011.
- [4] Hannon M., Stanton T., Casini S., Twiname R., Lake S.: SkyPath – A light weight FRP solution adding capacity to an existing highly loaded bridge. *Proceedings of Int. Conf. Footbridges: Past, Present & Future FOOTBRIDGE-2014*, 16-18 July 2014, London, England.
- [5] FRP footbridge at UK railway station, *Reinforced Plastics*, vol. 56 (6), November-December 2012, 6.
- [6] Chróścielewski J., Kreja I., Sabik A., Sobczyk B., Witkowski W.: Failure analysis of fo-

otbridge made of composite materials, w: *Shell Structures: Theory and Applications Vol. 3*, CRC Press – Taylor & Francis Group, pod redakcją: Pietraszkiewicz W., Górski J., Londyn, 2014, p. 389 – 392.

[7] Zobel H., Karwowski W., Żółtowski K., Kozakiewicz A.: Badania kratownicowej kładki z kompozytu polimerowego zbrojonego włóknem szklanym. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 4/2005, 202 – 206.

[8] Chróścielewski 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.

[9] Poneta P., Kulpa M., Włask L., Siwowski T.: Koncepcja i badania innowacyjnego dźwigara mostowego z kompozytów FRP. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 3/2014, 147 – 151.

[10] Kaw A. K.: *Mechanics of Composite Materials (2nd edition)*. CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.

[11] Gurit, Guide to composites (v5), dostępny na stronie: [www.gurit.com/guide-to-composites.aspx](http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx)

[12] Ashby M. F., Jones D. R. H.: *Engineering Materials 2. An Introduction to Microstructures, Processing and Design (3rd edition)*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2006.

[13] Kłasztorny M. i in.: Badania identyfikacyjne kompozytu BG/F nowego wygrzewanego w temperaturze 20 °C, Raport badawczy z projektu FOBRIDGE Nr F/6/2013, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2013.

[14] Ollson R.: A survey of test methods for multiaxial and out-of-plane strength of composite laminates, *Composite Science and Technology*, 71, (2011), 773 – 783.

[15] Hinton M. J., Kaddour A. S., and Soden P. D.: *Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise*. Elsevier, Amsterdam, 2004.

[16] Puck A., Schürmann H.: Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. *Composites Science and Technology*, vol. 58 (7), 1998, 1045 – 1067.

[17] Knops M.: *Analysis of Failure in Fiber Polymer Laminates*. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 2008.

[18] Hebda M.: Zastosowanie energetycznego kryterium wytrzymałościowego do analizy wytrzymałościowej kompozytów włóknistych. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, 2006.

[19] Chróścielewski J., Witkowski W., Sobczyk B., Daszkiewicz K.: Numerical simulations of novel GFRP sandwich footbridge. *Proceedings of Int. Conf. Footbridges: Past, Present & Future FOOTBRIDGE-2014*, 16-18 July 2014, London, England.

[20] Chróścielewski J., Kłasztorny M., Nycz D., Sobczyk B.: Warunki nośności i użytkowności w odniesieniu do kładek z laminatów polimerowych. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, vol. 13 (3), 189 – 202.

Otrzymano 19.01.2015 r.