

# Modelowanie i badania numeryczne belki kompozytowej GFRP sklejaney o przekroju skrzynkowym

K. P. Zając<sup>1, a)</sup>, M. Klasztorny<sup>1, b)</sup>, D. B. Nycz<sup>2, c)</sup>

<sup>1</sup>*Faculty of Mechanical Engineering, Military University of Technology, 2 Gen. W. Urbanowicza St., PL-00908 Warsaw, Poland*

<sup>2</sup>*Jan Grodek State Vocational Academy, 21 Mickiewicza St., Sanok, PL-38500, Poland*

<sup>a)</sup> Corresponding author: kamil.zajac@wat.edu.pl

<sup>b)</sup> marian.klasztorny@wat.edu.pl

<sup>c)</sup> dnycz@pwsz-sanok.edu.pl

**Abstrakt.** Przedmiotem badań jest cienkościenna belka skrzynkowa o rozpiętości 2.00 m, wytworzona z dwóch powłok kompozytowych GFRP sklejonych ze sobą na całej długości belki. Belkę poddano próbie trójpunktowego zginania sterowanego przemieszczeniem w zakresie od 0 do 300 mm. Przeprowadzono eksperymentalną próbę zginania, modelowanie numeryczne i symulacje tej próby oraz walidację modelowania i symulacji. W porównaniu z poprzednią pracą autorów, dokonano następujących korekt i rozszerzeń: korekta wymiarów powierzchni referencyjnej, stałych materiałowych i współczynników tarcia; testowanie kluczowych parametrów analizy układu nieliniowego geometrycznie i fizycznie, i.e. przyrost przemieszczenia w algorytmie implicit, współczynnik dokładności iteracji, gęstość siatki elementów skończonych; testowanie opcji kontaktu Glue w systemie MSC.Marc do modelowania warstwy kleju; wpływ wybranych sekwencji warstw laminatu na nośność belki skrzynkowej. Określono parametry i opcje modelowania numerycznego i symulacji kompozytowych powłok sklejonych ze sobą w systemie MSC.Marc, przydatne do szczegółowych obliczeń projektowych konstrukcji kompozytowych FRP.

## WSTĘP

Metodyka modelowania numerycznego i symulacji MES wybranych belek kompozytowych FRP była przedmiotem szeregu prac, m.in. [1-5]. Kubiak i Kaczmarek [1] przedstawili badania numeryczne i eksperymentalne słupów cienkościennych GFRE/CFRE obciążonych aż do zniszczenia. Kubiak i in. [2] przedstawili badania eksperymentalne cienkościennych ceowych słupów GFRE poddanych ścisłaniu statycznemu, wykorzystując metodę emisji akustycznej do badania progresywnego niszczenia. Walidację eksperymentalną modelowania MES słupów przeprowadzono w celu analizy zachowania się słupów po wyboczeniu i określenia obciążenia krytycznego. Gliszczyński i Kubiak [3] przedstawili oszacowanie nośności kompozytowych słupów ceowych poddanych ścisłaniu, dla wybranych sekwencji symetrycznych warstw laminatu GFRP. Modelowanie numeryczne i symulacje przeprowadzono za pomocą systemu ANSYS.

Klasztorny i in. [4, 5] opracowali metodykę modelowania numerycznego i symulacji powłok laminatowych GFRP, bazując na próbkach wzmocnionych tkaninami z przeplotem prostym i matami. Badania eksperymentalne i przeprowadzono na belkach i płytach wykonanych metodą ręcznego układania. Metodykę modelowania numerycznego i symulacji kładek skrzynkowych wybranego typu opracowali Klasztorny i in. [6]. Powłoki laminatu zawierają zrównoważone ortogonalne tkaniny zszywane i ognioodporną żywicę winyloestrową. Powłoki skleiono klejem NORPOL FI-184, tworząc przekrój skrzynkowy wielokomorowy. Metodyka opracowana w pracy [6] została poddana walidacji doświadczalnej z zastosowaniem testu zginania trzypunktowego belki skrzynkowej sklejaney [7]. Belka testowa odwzorowywała centralną skrzynkę konstrukcji nośnej kładki, w skali 1: 2 i po obróceniu segmentu o 180°.

W porównaniu z pracą [7], w niniejszej pracy przeprowadzono poprawione i rozszerzone badania numeryczne belki skrzynkowej w formie dwóch powłok sklejonych ze sobą na całej długości belki, poddanej próbie trójpunktowego zginania.

## WĘZŁY KLEJONE W KONSTRUKCJACH KOMPOZYTOWYCH FRP

Stan wiedzy naukowej i technicznej nt. połączeń klejonych powłok lub powłok przekładkowych z kompozytów FRP zawarto w pracy [8]. Rozpatrywane w literaturze połączenia klejone łączą ze sobą dwie powłoki na małej powierzchni w formie połączenia jednozakładkowego, dwuzakładkowego lub innego. Są to połączenia prostopadłe do kierunku działania obciążenia złącza, pracują głównie na ścinanie i są narażone na koncentracje naprężeń na krawędziach połączenia.

W niniejszej pracy rozpatruje się połączenie klejone dwóch powłok kompozytowych FRP w kierunku zgodnym z kierunkiem działania obciążenia złącza, na całej długości dźwigara belkowego. Takie połączenie pracuje głównie na rozciąganie lub ściskanie i nie jest narażone na koncentracje naprężeń.

Klej do połączenia powłok winyloestrowo-szklanych zastosowanych w niniejszej pracy powinien mieć następujące własności: zgodność chemiczna kleju z matrycą winyloestrową powłok, temperatura utwardzania złącza klejonego: 50°C, relatywnie wysokie wytrzymałości na rozciąganie kohezyjne i adhezyjne, relatywnie wysokie wytrzymałości na ścinanie kohezyjne i adhezyjne, relatywnie długi czas do rozpoczęcia żelowania kleju, zakres temperatury pracy złącza: [-30°C, +50°C], wysoka odporność na wilgotność i drgania. Klej konstrukcyjny NORPOL FI-184 (producent: Reichhold, Norway) spełnia ww. wymagania. Jest to materiał izotropowy na bazie winyloestru, przeznaczony do sklejania powłok poliestrowych/winyloestrowych, nadający do nakładania maszynowego.

## OPIS BELKI KOMPOZYTOWEJ GFRP, MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH ORAZ STANOWISKA BADAWCZEGO

Obiektem badań eksperymentalnych i numerycznych jest belka skrzynkowa wykonana z dwóch powłok laminatu winyloestrowo-szklanego, pokazana na RYS. 1 [7]. Osnową laminatu jest żywica winyloestrowa BÜFA® Firestop S 440 (producent BÜFA Gelcoat Plus Co., Germany). Zastosowano tkaniny szklane E dwukierunkowe zrównoważone zszywane BAT800 [0/90] i GBX800 [45/-45], o gęstości powierzchniowej 800 g/m<sup>2</sup> (producent DIPEX, Slovakia). Referencyjna symetryczna sekwencja warstw laminatów jest następująca: [BAT/GBX/BAT]<sub>s</sub>, przy czym tkaniny są rozwijane w kierunku długości belki.

Lamina odpowiada jednej tkaninie BAT lub GBX. Model materiałowy lamin jest ortotropowy liniowy sprężysto-kruchy. Stałe materiałowe laminy oznaczonej kodem BG/F wyznaczono w pracy [9] dla laminy nowej w temperaturze RT. Model materiałowy kleju jest izotropowy liniowy sprężysto-kruchy. Na podstawie karty produktu i danych literaturowych określono wartości stałych materiałowych kleju NORPOL FI-184, utwardzonego w temperaturze RT przez 24 h oraz w temperaturze 50°C przez 24 h.

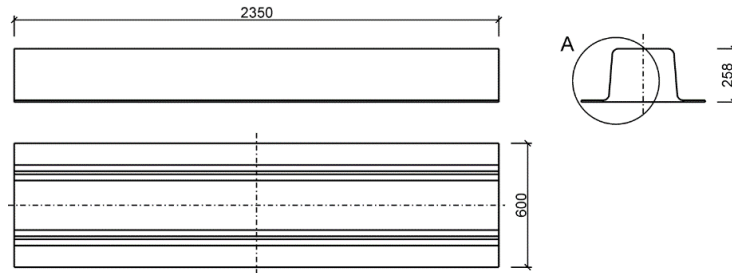
W eksperymentalnej próbie zginania trójpunktowego, swobodnie podpartą belkę skrzynkową obciążono stemplem sterowanym przemieszczeniem od 0 do 300 mm, z prędkością przesuwu 1 mm/s. Próbę przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej SATEC 1200, w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Katedry Mechaniki i Informatyki Stosowanej Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej.

## MODELOWANIE NUMERYCZNE UKŁADU PODDANEGO PRÓBIE ZGINANIA

Model numeryczny belki skrzynkowej wykonano w dwóch wariantach: SW01 – model, w którym spoina klejona jest warstwą laminatu 13-warstwowego w strefie kołnierzy; SW02 – model, w którym spoinę klejoną odwzorowano przez kontakt typu *Glue* [10] pomiędzy laminatami 6-warstwowymi. Powierzchnie referencyjne posiatkowano elementami skończonymi o topologii QUAD4 [11], o średnim wymiarze 15 mm (RYS. 2). Jest to siatka podstawowa (11 088 elementów skończonych, 11 176 węzłów). Oprócz siatki podstawowej symulacje przeprowadzono dla siatki dwa razy gęstszej i dwa razy rzadszej. Zadeklarowano dwie pionowe płaszczyzny symetrii oraz uwzględniono grawitację. Zastosowano elementy skończone *Bilinear Thick-shell Element* (nr 75) [11]. Przyjęto kryterium niszczenia Hashin Fabric oraz model niszczenia progresywnego *Selective Gradual Degradation* [10]. Stalowe podpory i stempel odwzorowano przez powierzchnie o właściwościach ciała idealnie sztywnego. Przyjęto kontakt typu *Touching* oraz tarcie Coulomba ze współczynnikami tarcia  $\mu=0.09$  dla pary stal-laminat i  $\mu=0.25$  dla pary laminat-laminat. W modelu SW02 wprowadzono kontakt typu *Glue* w strefie spoiny klejonej z modelem niszczenia zgodnym z modelem Hasin

Fabryka dla lamin. Do rozwiązania problemu zastosowano pełną metodę Newtona – Raphsona oraz siłowe kryterium zbieżności. W obliczeniach uwzględniono małe odkształcenia oraz duże obroty.

1:20

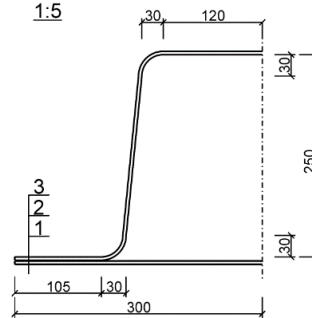


1. Laminat górny (TS) - 4.0mm: [0/45/0/0/45/0]
2. Klej NORPOL FI-184 - 0.5mm
3. Laminat dolny (BS) - 4.0mm: [0/45/0/0/45/0]

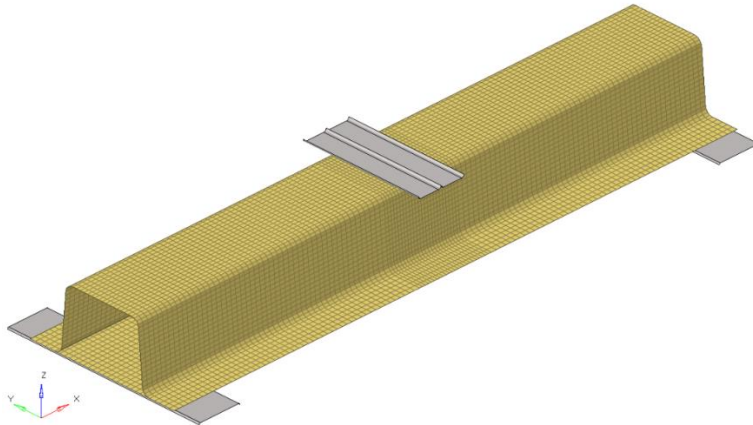
BAT 800 [0/90]  
GBX 800 [45/-45]

Szczegół A

1:5



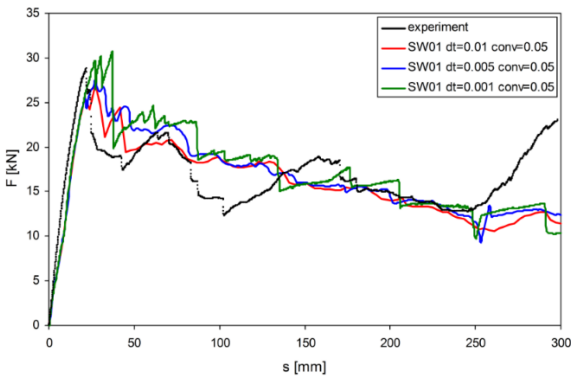
**RYSUNEK 1.** Belka sklejana skrzynkowa z laminatów GFRP [9]



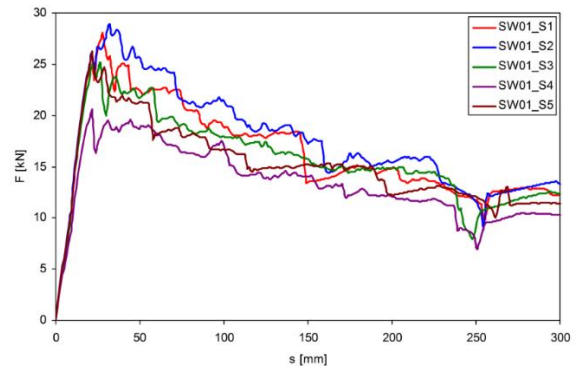
**RYSUNEK 2.** Model numeryczny układu poddanego próbie zginania (siatka podstawowa)

## BADANIA NUMERYCZNE

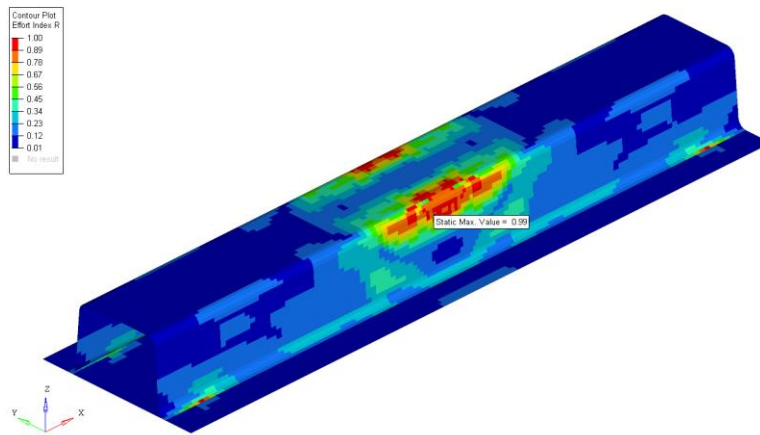
Parametry symulacji, tj. przyrost przemieszczenia oraz tolerancję zbieżności, określono dla wariantu SW01. Przykładowo, na RYS. 3 przedstawiono wykresy siła–przemieszczenie  $F(s)$  uzyskane dla względnych przyrostów przemieszczenia  $dt = 0.01, 0.005, 0.001$  i tolerancji zbieżności  $conv = 0.05$ . Badano również tolerancje 0.1 i 0.01. Symulacje przeprowadzono dla pięciu wariantów sekwencji warstw laminatów, tj. S1: [BAT/GBX/BAT]<sub>s</sub>, S2: [2×BAT/2×GBX/2×BAT], S3: [GBX/4×BAT/GBX], S4: [6×GBX], S5:[6×BAT]. Na RYS. 4 pokazano wykresy  $F(s)$  dla tych sekwencji, odpowiadające podstawowej siatce ES,  $dt=0.004$ ,  $conv=0.05$ . Na RYS. 5 pokazano globalną mapę indeksu wyczerpania w punkcie nośności, dla sekwencji S2 dającej największą nośność dźwigara.



**RYSUNEK 3.** Wykresy  $F(s)$  dla różnych wartości  $dt$  przy tolerancji zbieżności  $conv = 0.05$



**RYSUNEK 4.** Wykresy  $F(s)$  dla wybranych sekwencji warstw laminatu



**RYSUNEK 5.** Globalna mapa indeksu wyętnienia w punkcie nośności, dla sekwencji S2 (widok izometryczny od góry)

## PODZIĘKOWANIA

Praca została dofinansowana w ramach projektu NCBiR [grant PBS1/B2/6/2013]. Autorzy wyrażają podziękowanie dr. inż. Romanowi Gielecie (WAT) za przeprowadzenie eksperymentalnej próby zginania belki.

## LITERATURA

1. T. Kubiak, L. Kaczmarek, *Composite Structures* **119**, 749-756 (2015).
2. T. Kubiak, S. Samborski, A. Teter, *Composite Structures* **133**, 921-929 (2015).
3. A. Gliszczyński, T. Kubiak, *Composite Structures* **169**, 52-61 (2017).
4. M. Kłasztorny, A. Bondyra, P. Szurgott, D. Nycz, *Computational Materials Science* **64**, 151-156 (2012).
5. M. Kłasztorny, D. Nycz, R. Labuda, *Composite Structures* **184**, 604-612 (2018).
6. M. Kłasztorny, J. Chrościelewski, P. Szurgott, R. Romanowski, *Design and numerical testing of 5-box GFRP shell footbridge* (in: 5<sup>th</sup> International Conference on Footbridges, London, England, pp. 1-8, 2014).
7. M. Kłasztorny, D. Nycz, M. Cedrowski, *Composites Theory and Practice* **15**, 88-94 (2015).
8. M. D. Banea, L. F. M. da Silva, *Proc. IMechE, Part L: J. Materials: Design and Appl.* **223**, 1-18 (2009).
9. M. Kłasztorny, D. B. Nycz, R. K. Romanowski, P. Gotowicki, A. Kiczko, D. Rudnik, *Mechanics of Composite Materials*, **53**, 335-350 (2017).
10. MSC.Marc, Vol. A, *Theory and User Information* (MSC.Software Co., Santa Ana, CA, USA, 2013).
11. MSC.Marc, Vol. B, *Element Library* (MSC.Software Co., Santa Ana, CA, USA, 2013).