

Modelowanie i badania własności mechanicznych płyt kompozytu o wzmocnieniu jednokierunkowym

Modeling and experimental study of mechanical properties of composite plate with unidirectional reinforcement

ADRIAN SZYMANEK
MACIEJ PARAFINIAK
KRZYSZTOF GOŁOŚ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.12.168>
English version available on: www.mechanik.media.pl

W artykule przedstawiono wyniki dotyczące homogenizacji własności materiału kompozytowego o osnowie polimerowej z żywicy epoksydowej i utwardzacza, ze wzmocnieniem z włókien szklanych w postaci tkaniny jednokierunkowej. Przedmiotem analizy są uśrednione stałe sprężystości warstwy ortotropowej – zastępczy moduł Younga i zastępcza liczba Poissona. Przedstawiono wyniki obliczeń analitycznych, wstępnych badań doświadczalnych oraz symulacji komputerowych. Badania zostały wykonane w ramach pracy dyplomowej magisterskiej na wydziale SiMR Politechniki Warszawskiej.

SŁOWA KLUCZOWE: kompozyt wzmocniany włóknem szklanym GFRC, homogenizacja materiału kompozytowego, wzmocnienie jednokierunkowe, optyczna analiza odkształceń DIC, oprogramowanie NCORR

In the paper, authors present results of homogenization of GFRP material properties with unidirectional reinforcement. The scope of analysis and experimental study have been averaged mechanical properties of composite: Young modulus and Poisson's ratio in orthotropic layer. Analytical calculations, computer simulation and experimental results have been presented. The work is a part of master's thesis, prepared on Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering, Warsaw University of Technology.

KEYWORDS: glass fiber reinforced composite GFRC, homogenization of a composite material, unidirectional reinforcement, DIC, NCORR

Kompozyty są materiałami niejednorodnymi, składającymi się z co najmniej dwóch składników (wzmocnienia i osnowy) różniących się własnościami i spełniających w materiale różne funkcje. Osnowa pełni rolę spoiwa, dzięki czemu nadaje kształt wyrobom i przenosi obciążenia pomiędzy włóknami. Ponadto stanowi ochronę wzmocnienia przed uszkodzeniami mechanicznymi.

Wybór osnowy jest zdeterminowany przez środowisko, w jakim będzie zastosowany kompozyt. Wykorzystanie włókien jako wzmocnienia powoduje uzyskanie wysokich własności mechanicznych kompozytu. Generalnie są one tym wyższe, im wyższe są parametry wytrzymałościowe włókien oraz im wyższy jest ich udział objętościowy w materiale. Własności wypadkowe kompozytu zależą nie tylko od własności poszczególnych faz, lecz także od ich ilości w ogólnej objętości materiału oraz cech geometrycznych i sposobu rozmieszczenia wzmocnienia w osnowie. Kluczową rolę w projektowaniu kompozytów odgrywa proces technologiczny – jego poprawność determinuje ostateczne własności materiału [1]. Zainteresowanie materiałami kompozytowymi wynika m.in. z faktu, że mają one stosunkowo niski ciężar właściwy oraz bardzo dobre własności wytrzymałościowe, które można kreować np. przez odpowiedni dobór składników danego kompozytu. Możliwość uzyskania wymaganych cech materiałowych jest jedną z najważniejszych zalet kompozytów [6].

Homogenizacja kompozytów

Projektowanie elementów konstrukcyjnych z kompozytów wymaga znajomości własności mechanicznych tych materiałów. Możliwe jest przewidywanie tych własności na podstawie mikroskopowej budowy kompozytu. W takim przypadku konieczne jest zastosowanie odpowiednich procedur analitycznych bądź symulacji komputerowych – ten proces jest nazywany homogenizacją [2].

Podstawą analizy mikromechanicznej jest pojęcie reprezentatywnego elementu objętościowego (RVE – *representative volume element*), który jest najmniejszą możliwą częścią bądź wycinkiem materiału. Ten element z jednej strony musi uwzględniać udziały objętościowe wzmocnienia i osnowy, a z drugiej – poprawnie oddawać cechy makroskopowe całego materiału [4].

Najprostszą metodą analityczną wyznaczania zastępczych własności kompozytu jest zastosowanie zasady mieszanin lub odwrotnej zasady mieszanin [1, 2, 4].

W przypadku kompozytu o wzmocnieniu jednokierunkowym, po rozpatrzeniu rozciągania elementów w kierunku włókien, wyznaczono zależność na zastępczy moduł E_{11} [3]:

* Inż. Adrian Szymanek (adrian.szymanek@interia.pl); dr inż. Maciej Parafiniak (maciej.parafiniak@simr.pw.edu.pl) – Instytut Podstaw Budowy Maszyn – Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej; prof. dr hab. inż. Krzysztof Gołoś (k.golos@imbigis.pl) – Instytut Podstaw Budowy Maszyn – Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej oraz Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego

$$E_{11} = E_o V_o + E_w V_w \quad (1)$$

gdzie: E_o – stała sprężystości materiału osnowy, E_w – stała sprężystości materiału włókna, V_o – objętościowy udział osnowy, V_w – objętościowy udział włókien.

Analogicznie, rozważając rozciąganie w kierunku poprzecznym, zależność na zastępczy moduł E_{22} przyjmuje postać [3]:

$$E_{22} = \frac{E_o E_w}{V_o E_w + V_w E_o} \quad (2)$$

Zastępcze liczby Poissona wynoszą:

$$\nu_{12} = \nu_o V_o + \nu_w V_w \quad (3)$$

$$\nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_{22}}{E_{11}} \quad (4)$$

gdzie: ν_o – liczba Poissona osnowy, ν_w – liczba Poissona włókna.

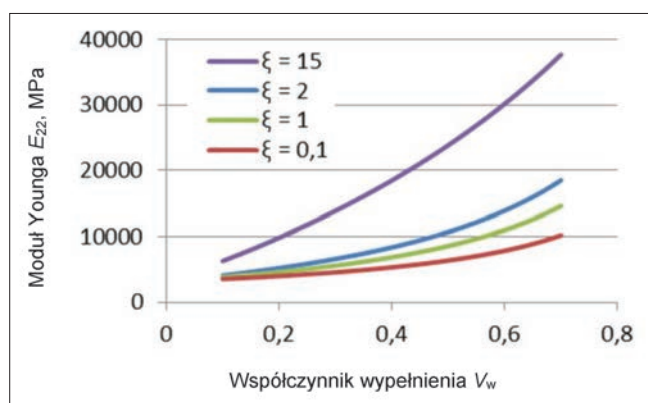
Do wyznaczania modułu Younga E_{22} w kierunku prostopadłym do zbrojenia często zamiast odwrotnej zasady mieszanin stosuje się semiempiryczny model zaproponowany przez Halpina i Tsai [3]:

$$E_{22} = E_o \frac{1 + \xi \eta V_w}{1 - \eta V_w} \quad (5)$$

przy czym:

$$\eta = \frac{\frac{E_w}{E_o} - 1}{\frac{E_w}{E_o} + \xi} \quad (6)$$

gdzie: ξ – współczynnik nazywany miarą wydajności zbrojenia [2], η – współczynnik zależny od stałych sprężystości materiału włókna i osnowy oraz od współczynnika ξ .



Rys. 1. Wykres zależności modułu Younga E_{22} w funkcji współczynnika wypełnienia według modelu Halpina-Tsai dla różnych wartości współczynnika ξ

Halpin i Tsai, powołując się na obliczenia numeryczne Adamsa, Donera i Thomasa, przyjęli współczynnik $\xi = 2$ do wyznaczenia E_{22} . Wielu innych autorów przedstawia w swych publikacjach własne uwagi i propozycje dotyczące wyznaczania tego współczynnika. Często zależy on od współczynnika wzmocnienia, układu włókien oraz ich kształtu i własności. Warto zauważyć, że po podstawieniu

$\xi \rightarrow \infty$ do równania Halpina-Tsai przyjmuje ono postać zasady mieszanin, a dla $\xi = 0$ odpowiada postaci odwrotnej zasady mieszanin.

Na rys. 1 przedstawiono zależność zastępczego modułu sprężystości E_{22} w funkcji współczynnika wypełnienia dla różnych wartości wydajności wzmocnienia ξ . Wartości te wykorzystano również do wyznaczania zastępczej liczby Poissona ν_{21} .

Badania doświadczalne

Badania statycznego rozciągania zostały podzielone na dwie części ze względu na sposób pomiaru odkształceń:

- z wykorzystaniem ekstensometru MFA 2,
- z wykorzystaniem metody cyfrowej korelacji obrazu DIC (*digital image correlation*).

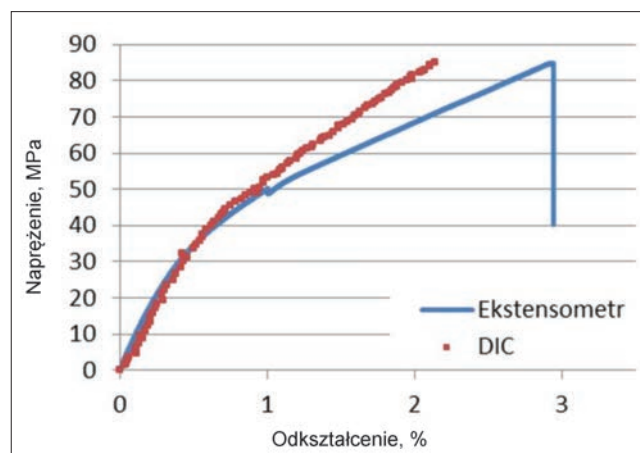
DIC jest jedną z bezkontaktowych metod optycznych pomiaru odkształceń, pozwalającą na uzyskanie rozkładu składowych stanu odkształcenia na powierzchni próbki. Metoda polega na wykonaniu zdjęcia badanego elementu w stanie nieobciążonym oraz serii zdjęć w czasie obciążania, a następnie na analizie obrazu deformacji za pomocą algorytmu programu DIC poszukującego ekstremum funkcji korelacji [5, 7]. W badaniach przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy system DIC wykorzystywał jeden aparat ustawiony w płaszczyźnie próbki, co umożliwiło uzyskanie dwuwymiarowych wyników. Analizę zdjęć przeprowadzono z użyciem dostępnego oprogramowania NCORR, tj. aplikacji do programu MATLAB.

Zaletą systemu DIC jest przede wszystkim to, że uzyskuje się połowy rozkład składowych stanu odkształcenia – w przeciwieństwie do ekstensometru, który uśrednia wyniki z długości odpowiadającej bazie pomiarowej. Ponadto pomiar jest bezkontaktowy, co jest korzystne zwłaszcza w przypadku badań delikatnych, cienkich próbek.

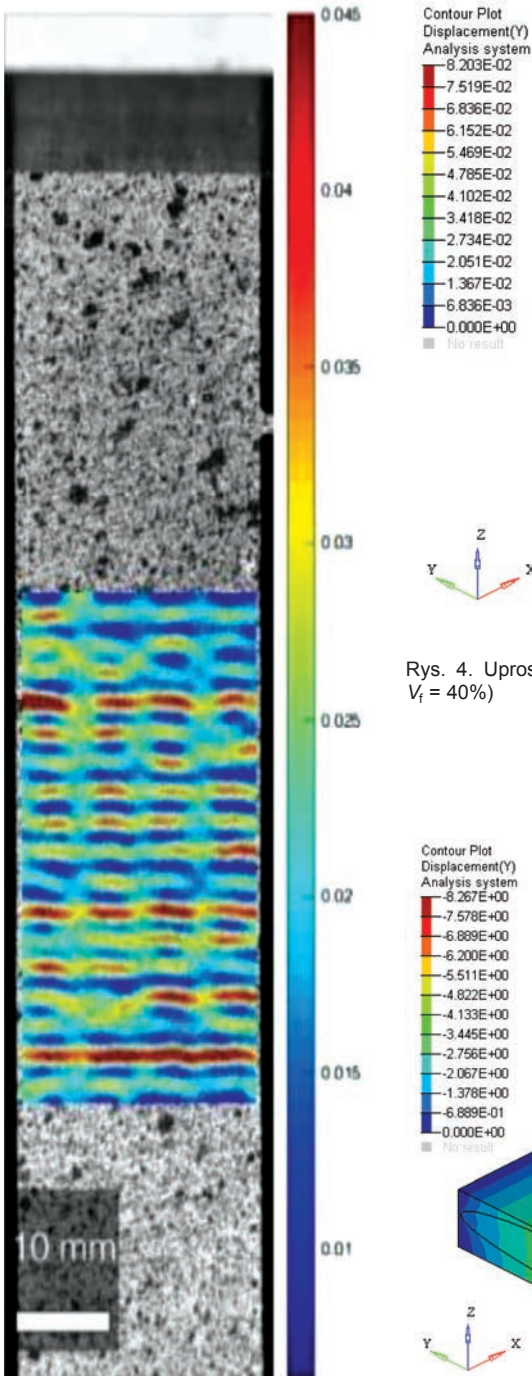
Co ważne, system DIC można stosować w odniesieniu do obiektów o większych wymiarach, a uzyskane wyniki mogą służyć do wyznaczania modułu Younga i współczynnika Poissona.

Do podstawowych problemów w zastosowaniu metody DIC należą: kłopotliwy proces pozycjonowania aparatu oraz konieczność nakładania losowego wzoru na badany element za pomocą metod natryskowych. Jednym z ograniczeń tej metody jest również stosunkowo długi czas analizy zdjęć [5].

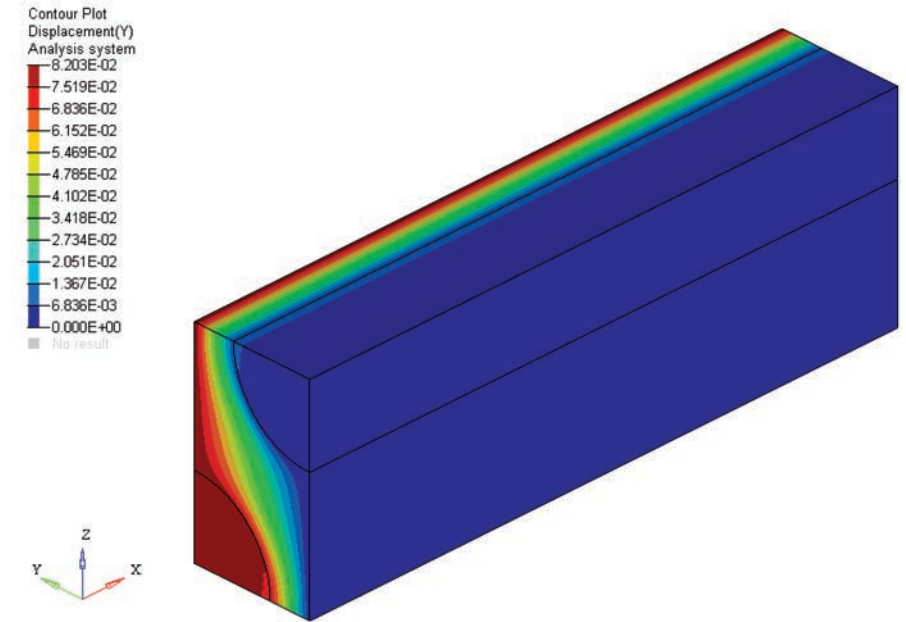
Na rys. 2 przedstawiono wyniki statycznej próby rozciągania w poprzek włókien próbek z płyty kompozytowej, a na rys. 3 – przykładowy wygląd pola odkształceń próbki.



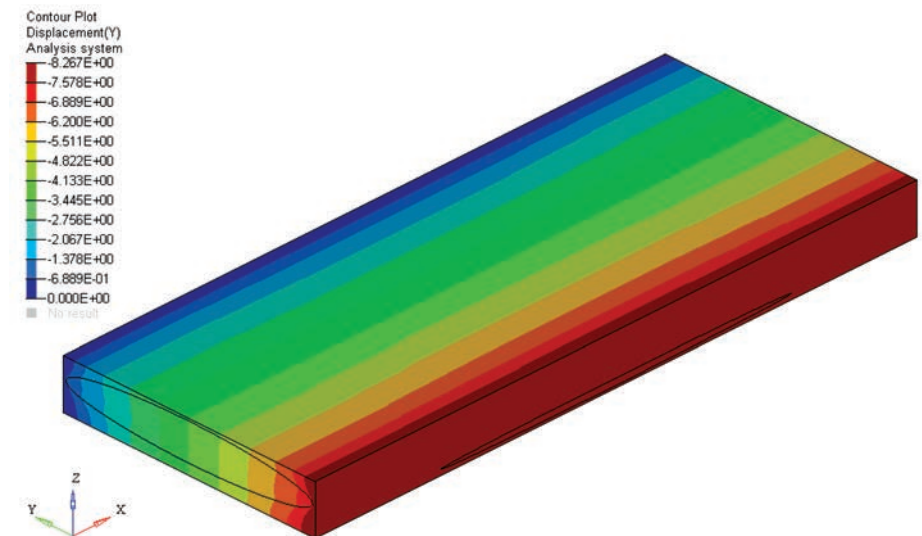
Rys. 2. Typowy wykres naprężenie-odkształcenie dla kompozytu UD w przypadku rozciągania w poprzek włókien



Rys. 3. Typowy wygląd pola odkształceń próbki kompozytu UD (włókna poprzecznie do kierunku rozciągania)



Rys. 4. Uproszczony element RVE – przemieszczenie w kierunku y (dla naprężenia $\sigma_y = 50$ MPa, $V_f = 40\%$)



Rys. 5. Dokładny element RVE – przemieszczenie w kierunku y (dla naprężenia $\sigma_y = 50$ MPa, $V_w = 44,2\%$, $V_{\text{pasma}} = 70\%$)

Symulacje numeryczne

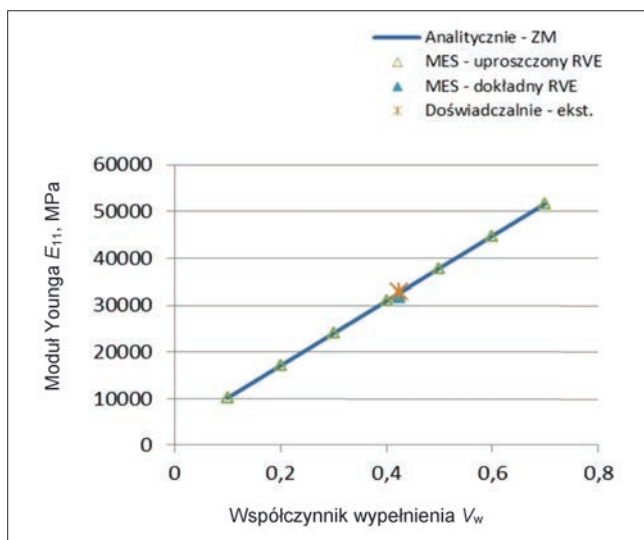
Kolejnym etapem było przeprowadzenie analizy numerycznej powtarzalnej mikrostruktury kompozytu. Model obliczeniowy stworzono w programie HyperMesh, a jako solvera użyto programu OptiStruct. Wykorzystano dwa rodzaje elementów RVE, które powstały w wyniku:

- modelowania uproszczonego – przez zamodelowanie włókien w układzie trójkątnym i osnowy między nimi,
- modelowania dokładnego – przez zamodelowanie przesyconego pasma włókien oraz samej osnowy pomiędzy pasmami. Założono lokalne przesycenie w pasmie na poziomie $V_{\text{pasma}} = 70\%$ oraz współczynnik przesycenia całego elementu na poziomie $V_w = 44,2\%$, co

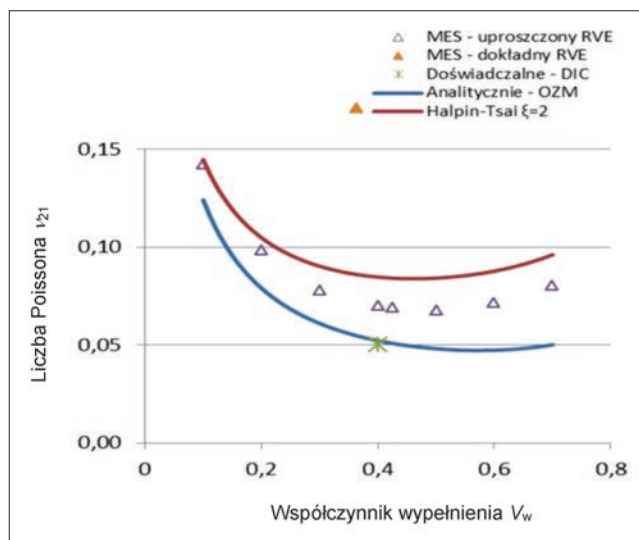
odpowiada poziomowi przesycenia badanej płyty kompozytowej.

Przez pasmo należy rozumieć wycinek tkaniny rowingowej, który jest zbudowany z połączonych ze sobą włókien elementarnych. Włókno i osnowa zostały zamodelowane jako jednorodne, izotropowe, natomiast przesycone pasmo w drugim modelu – jako jednorodne, ortotropowe. Użyto elementów pierwszego rzędu (ośmiowęzłowych HEX oraz sześciowęzłowych PENTA). Zostały nadane przemieszczeniowe warunki brzegowe (*displacement boundary conditions*), tak aby zasymulować wpływ pozostałej części materiału.

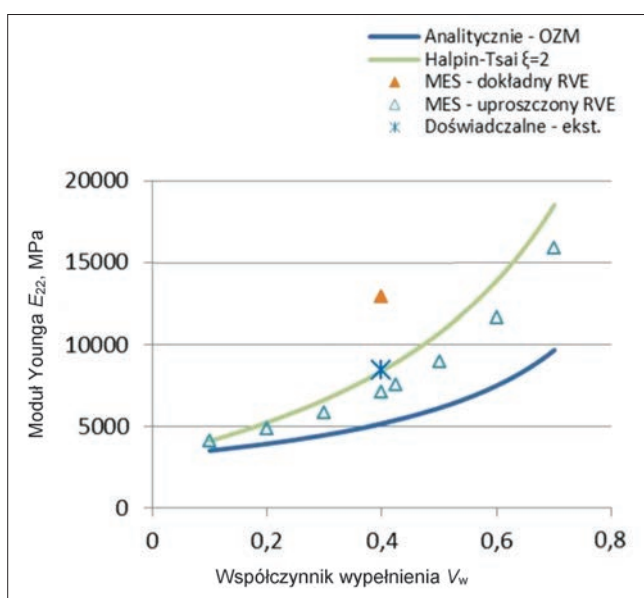
Wyniki symulacji, a także wyniki doświadczeń i analityczne zaprezentowano na rys. 4–9.



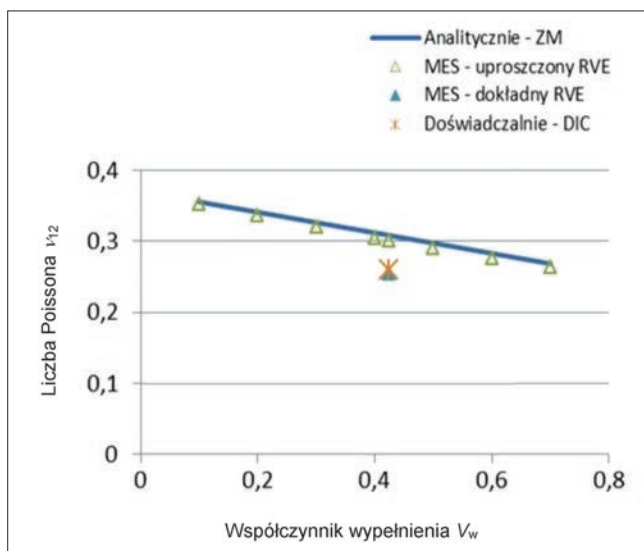
Rys. 6. Zastępczy moduł Younga E_{11} w funkcji współczynnika wypełnienia dla kompozytu UD



Rys. 9. Zastępcza liczba Poissona ν_{21} w funkcji współczynnika wypełnienia dla kompozytu UD



Rys. 7. Zastępczy moduł Younga E_{22} w funkcji współczynnika wypełnienia dla kompozytu UD



Rys. 8. Zastępcza liczba Poissona ν_{12} w funkcji współczynnika wypełnienia dla kompozytu UD

Analiza wyników i podsumowanie

W ramach pracy przeprowadzono obliczenia analityczne zastępczych własności mechanicznych materiału kompozytowego ze wzmocnieniem tkaniną jednokierunkową, tj. zastępczego modułu Younga i zastępczej liczby Poissona, a następnie dokonano ich weryfikacji doświadczalnej. Wykonano również symulację MES elementu RVE. Na rys. 6–9 graficznie przedstawiono uzyskane wyniki doświadczalne wraz z wynikami analitycznymi oraz numerycznymi.

Zastosowanie metody DIC do wyznaczenia składowych stanu odkształcenia pozwoliło na sporządzenie wykresów naprężenie–odkształcenie, a zastosowanie ekstensometru na tej samej próbce umożliwiło bezpośrednie porównanie otrzymanych wyników. Potwierdzono dobrą zgodność wyników uzyskanych obiema metodami pomiarowymi. Różnice odkształceń przekraczające 1% wynikają z faktu, że powyżej tej wartości zdejmowano ekstensometr, a odkształcenie było dalej obliczane przez system pomiarowy na podstawie przemieszczenia trawersy maszyny. Wykazano również przydatność systemu DIC do badania materiałów kompozytowych, które w przeciwieństwie np. do próbek metalowych nie mają gładkiej powierzchni. Mimo przeciętnej jakości wzoru naniesionego na próbki udało się zaobserwować lokalne zmiany składowych stanu odkształcenia, które wynikają z geometrii tkaniny.

LITERATURA

1. Boczkowska A., Krzesiński G. „Kompozyty i techniki ich wytwarzania”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016.
2. German J. „Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych”. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2001.
3. Halpin J.C., Tsai S.W. „Effect of Environmental Factors on Composite Materials”. AFML-TR-67-423. 1969.
4. Jones R. „Mechanics of Composite Materials”. Wydanie II. CRC Press, 1999.
5. Kowalewski Z.L., Dietrich L., Kopec M., Szymczak T., Grzywna P. „Nowoczesne systemy optyczne w badaniach mechanicznych – budowa, działanie, zastosowanie”. XXII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, 16–18 marca 2016 r., Zakopane, s. 5–36.
6. Kurnik W., Tylikowski A. „Mechanika elementów laminowanych”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1997.
7. Schreier H., Orteu J.J., Sutton M.A. „Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements”. Boston: Springer US, 2009. ■