

Inspekcja struktur kompozytowych przy użyciu skanowania 3D

Agnieszka Bondyra, Przemysław Pastuszek*

Szeroki zakres stosowanych obecnie optycznych technik pomiarów akcentuje potrzebę coraz dokładniejszego opisu geometrii. Nowe zastosowania zaawansowanych materiałów, takich chociażby jak materiały kompozytowe, wymagają metod pomiarowych, które będą mogły być zastosowane w obszarach na przykład inżynierii odwrotnej, walidacji modeli MES, szybkiego prototypowania i analizy deformacji struktur. Techniki optyczne bazujące na świetle białym i laserowym takie jak fotogrametria, triangulacja laserowa, prążki Moire, optyczna tomografia koherencyjna pozwalają na dość szczegółowe i wielopłaszczyznowe analizowanie geometrii badanych struktur. Powszechnie stosowane metody optyczne biorą pod uwagę zmianę globalnych i lokalnych współrzędnych struktury na skutek deformacji, a także dokładność, rozdzielczość i niepewność pomiaru. Są one stosowane w odniesieniu do tendencji badawczych, takich jak bezpośredni pomiar kształtu powierzchni, kalibracja systemu pomiarowego i metody optymalizacji.

W prezentowanym artykule przeanalizowano kształt próbek kompozytowych ze sztucznie umiejscowionymi delaminacjami między ich warstwami i struktury bez takich defektów. Skanowaniu 3D poddano geometrie o kształcie prostokąta, cylindra i krzywoliniowym. Próbki były wytwarzane dwoma technikami: autoklawu i worka próżniowego. Rezultaty w formie odchyłek 3D, zaprezentowane w tej analizie pokazują różnice w kształcie i wymiarach geometrii otrzymanej po obróbce danych ze skanowania. Proces inspekcji przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym, wirtualne modele geometrii ze skanowania zostały użyte do określenia wymiarów geometrii. Następnie, określono ich krzywizny i generalne wymiary oraz tolerancje (GD&T). Ponadto wykorzystanie skanowania 3D pozwoliło

zaobserwować zmianę grubości próbki związaną z defektami wewnątrz struktury w postaci delaminacji. Zastosowana metoda pozwoliła na rejestrację zmiany promienia krzywizny i inne defekty powstałe przy produkcji materiałów kompozytowych. Zaprezentowane rezultaty pokazują pozytywny wpływ użycia dodatkowej płyty aluminiowej przy produkcji kompozytów metodą worka próżniowego na jakość geometrii otrzymanej struktury, ponieważ uzyskane próbki charakteryzują się lepszymi poziomami płaskości i równoległości w przypadku próbek równoległych oraz cylindryczności, jeżeli chodzi o powłoki zakrzywione. Opisywana metodologia inspekcji jest prosta, pozwala uzyskać wielopłaszczyznowe rezultaty, a jej stosowanie nie jest ograniczone do warunków laboratoryjnych. Jedną

z kluczowych kwestii w wielu dziedzinach przemysłu jest produkcja konstrukcji kompozytowych. Główne trudności w procesie produkcji są związane z jakością różnych geometrii tego typu konstrukcji. Cechy geometrii i wady wewnątrz struktur w warunkach pracy są rozważane w analizach doświadczalnych i numerycznych zaprezentowanych w [12]. W niektórych przypadkach obecnych zastosowań struktur kompozytowych przydatny jest monitoring zmiany geometrii w warunkach online. Wiele technik badań nieniszczących, takich jak tomografia lub skanowanie 3D, wykorzystywanych jest obecnie do kontroli jakości powierzchni po procesach produkcyjnych lub do wykrywania defektów w rzeczywistych struktur [3-5, 7-9]. Z jednej strony sposoby wizualnej kontroli jakości

mają takie zalety jak: szybkie pozyskiwanie danych i niskie koszty przetwarzania ich, lecz z drugiej strony, techniki te są szczególnie wrażliwe na błędy operatora i wymagają od niego pewnego poziomu doświadczenia. Istnieje możliwość częściowego wyeliminowania stron ujemnych tych metod na skutek precyzyjnej kalibracji i konfiguracji urządzenia przed wykonywanymi pomiarami. Niezależnie od ostrożności przy wykonywaniu tych pomiarów, dodatkowe badania kontrolne są zalecane zgodnie z literaturą [2]. W prezentowanych rozważaniach dokonano porównania struktur kompozytowych o zróżnicowanych geometriach ze sztucznie wprowadzonymi defektami w celu wyszczególnienia różnic w metodach wytwarzania kompozytów za pomocą metody worka próżniowego



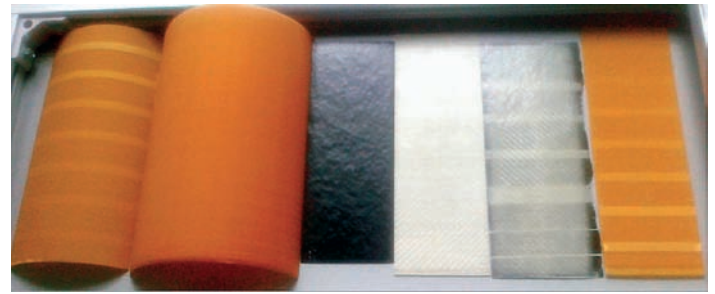
i autoklawu. Zastosowanie do tego celu metody skanowania laserowego 3D pozwoliło na zwizualizowanie wyników różnic pomiędzy mierzonymi geometriami. Dodatkowo metoda ta pozwala na określenie wpływu defektów wewnętrznych na gabaryty [1]. Prezentowana praca jest ograniczona do pomiarów i inspekcji małych elementów wykonanych ze struktur kompozytowych, ale pomiary z użyciem skanera 3D mogą także pomóc w analizie większych struktur przy użyciu podziału na segmenty rejestrowanej struktury [1]. W procesie inspekcji prezentowanym w tych rozważaniach, do akwizycji zarejestrowanych punktów pomiarowych, używany był przenośny skaner laserowy 3D, REVSAN, którego producentem jest firma Creaform [6]. Główne wielkości charakteryzujące to urządzenie są następujące:

- waga: 980 gram;
- gabaryty: 160×260×210 mm;
- szybkość pomiarów: 18 000 pomiarów/s;
- dokładność: do 0,05 mm;
- rozdzielczość w osi z: 0,1 mm;
- obszar laserowego krzyża pomiarowego: 210mm×210mm. Skanowanie 3D było wykonywane z użyciem techniki *black box*, która pozwala na bardzo dokładny pomiar geometrii bez wprowadzania do niej dodatkowych grubości znaczników pozycjonujących. Znaczniki pozycjonujące umieszczono w otoczeniu mierzonych struktur kompozytowych. Pomiary zostały wykonane po uprzedniej kalibracji i konfiguracji

urządzenia pomiarowego. Zeskanowano zewnętrzną i wewnętrzną powierzchnię technologie struktury kompozytowej. Pomiary zostały wykonane z dokładnością do 0,05 mm. We wszystkich analizowanych przykładach, zarejestrowane za pomocą skanera 3D finalne wirtualne geometrie próbek były zbudowane z ponad 500 000 punktów pomiarowych.

Proces produkcji kompozytów

Wysoka zawartość objętościowa włókien w całej objętości struktury kompozytowej jest możliwa do osiągnięcia dzięki zastosowaniu nowoczesnych metod produkcji. W celu osiągnięcia wysokiej jakości otrzymanego kompozytu, warstwy prepregów łączonych z żywicą są poddawane dodatkowemu ciśnieniu [10]. Metoda worka próżniowego w połączeniu z infuzją pozwala na produkcję nawet dużych części struktur kompozytowych wykonanych w dwóch etapach. W pierwszym, warstwy wzmocnienia ułożone w formie są impregnowane polimerami ciekłymi. Następnie kompozyty w formie półproduktów są poddawane działaniu pompy ciśnieniowej. Rozkład ciśnienia wpływa znacząco na parametry produkcji. Pierwsze przedstawienia tej metody w literaturze miały miejsce już w 1978 w pracach Gotcha. Modele matematyczne opisujące zmianę warunków w czasie procesu produkcji są szeroko przedstawiane w literaturze [13]. Szybkość przepływu j w procesie wytwarzania materiałów kom-



Rys. 1. Zeskanowane struktury –wybrane próbki

pozytowych jest opisywana przez prawo Darcy'ego:

$$j = \frac{-D}{\eta} P \quad (1)$$

gdzie: D – przepuszczalność formy wstępnej, η – lepkość żywicy, P – ciśnienie hydrostatyczne. Prędkość uwolnienia energii G jest opisywany przez zależność gęstości energii i grubości warstwy nasączonej żywicą [13]:

$$G = \xi \frac{(h-b)}{E_w} (\sigma_{II}^w)^2 \quad (2)$$

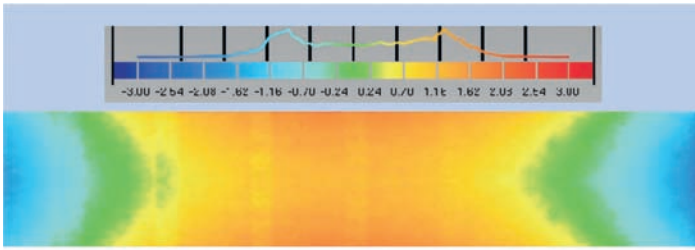
gdzie: h – grubość nasączonej warstwy, b – grubość regionu nienasyconego żywicą, E_w – moduł Young'a strefy nasyconej, σ_{II}^w – komponent tensora naprężeń prostopadły do kierunku przepływu, ξ – stała eksperymentalna.

Jeżeli $G > G_c$ w regionie nienasyconym, następuje wtedy katastroficzny wzrost pęknięcia, w przypadku $G = G_c$ mamy do czynienia ze stabilnym wzrostem. Metoda wytwarzania z użyciem autoklawu ma dwa główne etapy: zmiany temperatury (ogrzewanie, chłodzenie) i ciśnienia [12]. Wytwarzanie z użyciem autoklawu gwarantuje wysoka jakość wytworzonych struktur kompozytowych. W tym procesie, poszczególne warstwy prepregów są układane

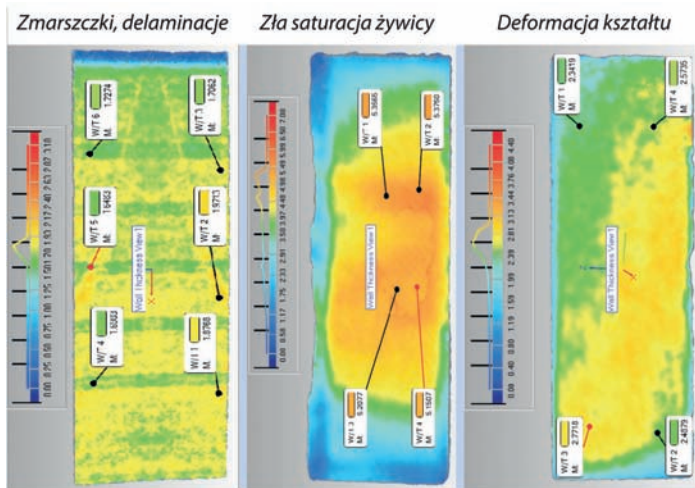
razem, a produktem finalnym jest jedna struktura kompozytowa [11].

Rezultaty inspekcji

W tej pracy analizie poddano próbki wytworzone metodami worka próżniowego i autoklawu. W swoich rozważaniach skupiliśmy się na trzech typach struktury ze zróżnicowaną geometrią: prostokątne, zakrzywione (rys. 1) i pełny cylinder, wytworzone z kompozytów wzmocnionych włóknami szklanymi typu R. Sztucznie wytworzone delaminacje są wytworzone z użyciem folii teflonowej. Pozostałe typy defektów zostały wywołane w procesie produkcji. Cechy geometryczne, podobnie jak typowe defekty powstałe w czasie produkcji, zostały wywołane w procesie produkcji i przy metodzie worka próżniowego. Dodatkowo pokazano wpływ dodatkowego elementu w postaci płyty aluminiowej, przy zastosowaniu metody worka próżniowego. Zeskanowano próbki i w oparciu o wyniki skanowania 3D sporządzono modele wirtualne. Pomiar geometrii i proces inspekcji został wykonany z użyciem oprogramowania Geomagic Control 2014. Za



Rys. 2. Porównanie struktur kompozytowych wytworzonych w technologii autoklawu i metodą worka próżniowego



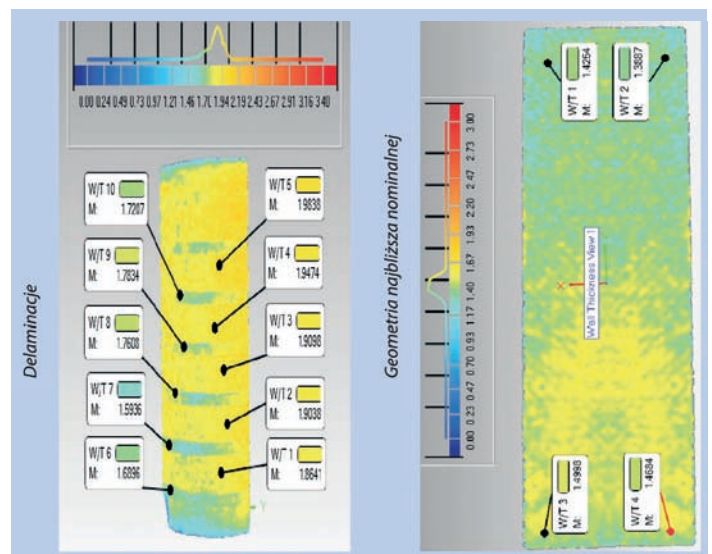
Rys. 3. Próbkki wytwarzane metodą worka próżniowego

pomocą pomiarów przy użyciu skanowania 3D jesteśmy w stanie zlokalizować defekty struktury, takie jak deformacja geometrii lub zła saturacja żywicy oraz defekty wewnętrzne, wpływające na grubość finalnie powstałego materiału kompozytowego. Porównanie wykonanych do badań i pomiarów próbek z użyciem metody worka próżniowego i autoklawu przedstawiono na rys. 2. Próbkka wykonana w autoklawie została potraktowana jako obiekt referencyjny, a próbkka o tych samych wymiarach wykonana w technice worka próżniowego była obiektem testowym. Porównanie pokazuje krzywiznę próbkki wykonanej w technologii worka próżniowego w części centralnej. W dal-

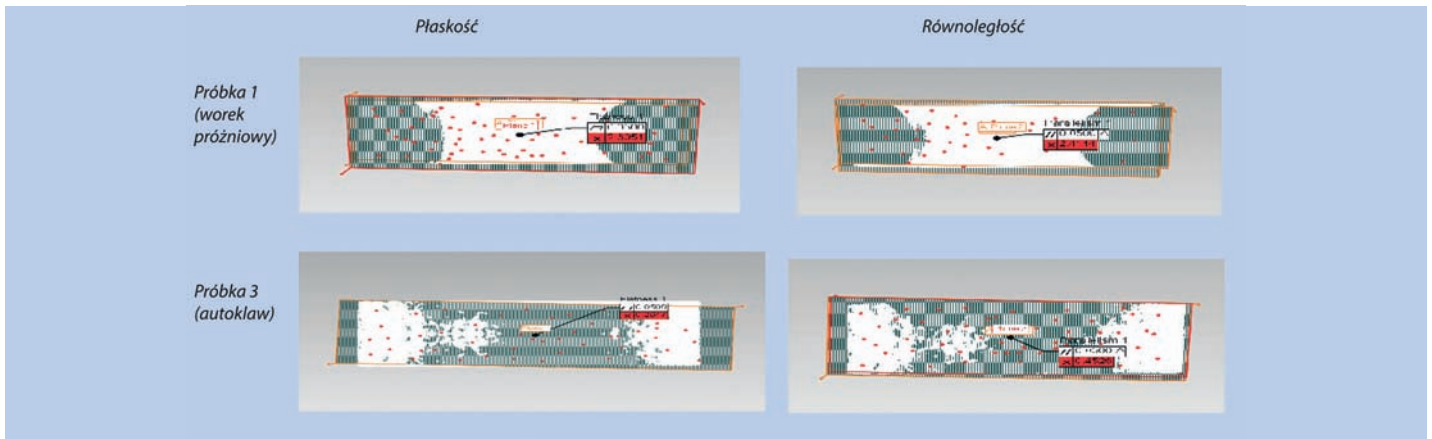
szych rozważanych przedstawione są: pomiar grubości próbek oraz analiza ogólnych generalnych wymiarów i tolerancji dla przykładowych dwóch próbek. Sprawdzenie grubości ściany dla analizowanych próbek daje szansę na lokalizację defektów, które wpływają na jej grubość. W przypadku prostokątnych próbek wytworzonych metodą worka próżniowego zlokalizowano defekty w postaci symetrycznych zmarszczek, złej saturacji żywicy i deformacji kształtu (rys. 3). Dodatkowo, zmiany grubości ściany struktury związane są z delaminacjami zlokalizowanymi w próbkach o różnych geometriach. W przypadku, gdzie widoczna jest zmiana grubości w cen-

tralnej części próbkki, sytuacja taka miała miejsce w wyniku złej saturacji żywicy. Ponadto widoczny jest fragment, gdzie można dostrzec układ włókien wzmocnienia, ponieważ żywica nie dopłynęła do niego w stopniu wystarczającym. Różnice w grubości współgrają w tym przypadku z nierównomierną dystrybucją żywicy. Oba typy defektów nie są widoczne w przypadku ostatniej próbkki, gdyż przy jej wykonywaniu zastosowano element dodatkowy w postaci aluminiowej płyty. Ten fakt nie wpłynął jednak na całkowite zlikwidowanie deformacji kształtu. Grubości próbek wykonanych przy zastosowaniu autoklawu (rys. 4) wykazują najlepszą zgodność z wymiarami nominalnymi i najmniejszy rozrzut wartości grubości. Nie zaobserwowano na tych próbkach defektów typu zmarszczki lub zła saturacja żywicy. Także zakrzywiona struktura kompozytowa wykazała lepszą jakość wykonania. Dodatkowo na wszystkich zaprezentowanych rysunkach

z rezultatami procesu inspekcji umieszczono histogramy pokazujące rozkłady wartości grubości próbek. Na pokazanych rozkładach odchyłek 3D widoczna jest tendencja do bardziej regularnego rozkładu grubości w przypadku próbek wykonanych metodą autoklawu (rys. 4). W następnej części została przeprowadzona analiza GD&T dla wybranych opisywanych wcześniej próbek. W przypadku próbek wykonanych metodą worka próżniowego (rys. 5) można zaobserwować, że w przykładach geometrii cylindrycznej mamy do czynienia z mniejszym błędem równoległości i równoległości jest widoczna, jeśli chodzi o próbki wytworzone metodą autoklawu. Błąd cylindryczności w przypadku próbek wytwarzanych metodą worka próżniowego bez delaminacji jest wyższy niż w przypadku struktur cylindrycznych wytwarzanych metodą worka próżniowego z delaminacjami. Błąd cylindryczności jest we wszystkich



Rys. 4. Próbkki wytwarzane metodą autoklawu



Rys. 5. Wymiary geometryczne i tolerancje – wybrane próbki

przypadkach na podobnym poziomie w przeciwieństwie do błędów płaskości i równoległości. W niektórych przypadkach rezultaty uzyskane z pomiarów geometrii i tolerancji mogą posłużyć jako wskazówki do dalszej obróbki. Ponadto, pomiary za pomocą skaningu 3D pozwalają na zbudowanie dokładniejszego modelu geometrycznego do analiz numerycznych, co skutkuje na przykład lepszą zgodnością przy walidacji modeli obliczeniowych metody elementów skończonych.

Podsumowanie

W tych rozważaniach zostały przedstawione rezultaty inspekcji próbek wykonanych metodą worka próżniowego i autoklawu. Na podstawie danych ze skanowania 3D sporządzono modele wirtualne, bazujące na plikach STL, uzyskanych z chmury punktów pomiarowych. Porównania dotyczyły dwóch aspektów: różnych geometrii i różnych technik wytwarzania.

Wyniki w postaci pomiarów grubości i GD&T pozwoliły porównać jakość wykonania uzyskiwaną przy zastosowa-

niu analizowanych metod produkcji struktur kompozytowych.

Literatura

- [1] Bere, P., Neamtu, C.: Methodology for evaluate the form deviations for formula one nose car, Central European Journal of Engineering, Vol. 4, Issue 2, pp. 148-154, 2014.
- [2] Böer P., Holliday L., Kang T. H.-K.: Interaction of environmental factors on fiber-reinforced polymer composites and their inspection and maintenance: A review, Construction and Building Materials, Vol. 50, pp. 209-218, 2014.
- [3] Bondyra A., Chwał M., Pastuszak P.D.: Prospects of laser measuring scanners applications for analysis of the deformation of composite structures, Przetwórstwo Tworzyw, pp. 4-11, 2014.
- [4] Bondyra, A., Chwał, M., Pastuszak, P. D., Stawiarski, A.: Analysis of composite structure deformations based on 3D laser scanner measurements, Composites Theory and Practice Vol. 1, pp. 38- 42, 2014.
- [5] Dong, Q. G., Ma, J. F., Lin, H., Chen, Ch. Q., Yang, F.: Precision Analysis of the Surface

Model Based on Geomagic Qualify, Applied Mechanics and Materials, Vol. 490-491, pp. 649653, 2014.

[6] <http://www.creaform3d.com/en>

[7] Ibrahim, M. E.: Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures: A review, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 64, pp. 3648, 2014.

[8] Lemes, S., Validation of Numerical Simulations by 3D Scanning: Springback Compensation in 3D Scanning by Finite Element Analysis, LAP Lambert Academic Publishing, 2012.

[9] Liu, P., Groves, R. M., Benedictus, R.: 3D monitoring of delamination growth In a wind turbine blade composite Using optical coherence tomography, NDT & E International, Vol. 64, pp. 52-58, 2014.

[10] Preglej, A. Karba, R., Steiner, I., Škrjanc, I.: Mathematical Model of an Autoclave, Strojniški vestnik Journal of Mechanical Engineering, vol. 57, no.6, p. 503-516, 2011.

[11] Sevostianov, I.B., Verijenko, V.E., von Klemperer, C.J., Chevallere, B.: Mathe-

matical model of stress formation during vacuum resin infusion process, Composites Part B Engineering, pp. 513-521, 1999.

[12] Short, G. J., Guild, F. J., Pavier M. J.: The effect of delamination geometry on the compressive failure of composite laminate, Composites Science and Technology, Vol. 61, Issue 14, pp. 2075-2086, 2001.

[13] Vasileios, M.D., Seferis, J.C., Doumanidis, C.C.: Curing Pressure Influence of Out-of-Autoclave, Processing on Structural Composites for Commercial Aviation, Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2013, pp. 1-14, 2013.

* dr inż. Agnieszka Bondyra, Politechnika Krakowska Wydział Mechaniczny; e-mail: abondyra@mech.pk.edu.pl

mgr inż. Przemysław Pastuszak, Politechnika Krakowska Wydział Mechaniczny; e-mail: ppastuszak@pk.edu.pl

Artykuł ukazał się w „Materiały Kompozytowe” nr 4/2014

