

Zaawansowana analiza wytrzymałościowa wypraski z kompozytu WPC z uwzględnieniem powtryskowej orientacji włókien w osnowie polimerowej

Advanced method of strength simulation of a WPC composite molding with orientation of fibers in polymer matrix considered

WIESŁAW FRĄCZ
GRZEGORZ JANOWSKI*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.226

Przeprowadzono analizę numeryczną testu rozciągania próbki z kompozytu drewno-polimer (WPC) z uwzględnieniem jego heterogenicznych właściwości. Dane dotyczące orientacji włókien uzyskano z użyciem oprogramowania Autodesk Moldflow Insight 2013. Właściwości kompozytu zdefiniowano za pomocą oprogramowania Digimat 6.0.1, a obliczenia wytrzymałościowe wykonano w programie Ansys 15. Wyniki symulacji numerycznych porównano z eksperymentem.

SŁOWA KLUCZOWE: symulacje numeryczne, kompozyty WPC, Autodesk Moldflow, Digimat, modelowanie wieloskalowe

The paper presents numerical simulation of the tensile test to a wood-polymer composite (WPC) specimen with its heterogeneous properties considered. The data on fibers orientation were obtained by means of the Autodesk Moldflow Insight 2013 software to commercial code. Composite properties of the specimen were defined by means Digimat 6.0.1 software. Strength calculations were performed using the ANSYS 15 software. Results of numerical simulations and of the experiment were compared with each other.

KEYWORDS: numerical simulations, WPC composites, Autodesk Moldflow, Digimat, multi-scale analysis

Połączenie walorów estetycznych drewna z trwałością polimeru, przy względnie dobrych właściwościach mechanicznych oraz lepszych niektórych właściwościach fizykochemicznych niż wykazują czyste tworzywa polimerowe, czyni kompozyty drewno-polimer atrakcyjnym materiałem. Wytwory WPC z napełniaczem drzewnym charakteryzują się wyższą sztywnością, a w porównaniu z drewnem i tworzywami drzewnymi – znacznie niższą nasiąkliwością i pęcznieniem oraz niższym skurczem liniowym [1, 2]. Nie stanowią one zagrożenia dla środowiska w trakcie przetwarzania i recyklingu [3, 4], a po odpowiedniej modyfikacji są częściowo biodegradowalne [5].

Coraz częściej w branży przetwórstwa podczas projektowania wykorzystuje się zaawansowane narzędzia CAX [6-8]. W standardowych analizach wytrzymałościowych pomija się heterogeniczną strukturę kompozytów, jednak w zastosowaniach przemysłowych zachodzi konieczność implementacji nowych technik obliczeniowych, uwzględniających specyficzne właściwości tych materiałów. Bardzo ważnym obszarem badań jest tworzenie opisu matematycznego heterogenicznych właściwości kompozytów.

W przypadku kompozytów wzmacnianych włóknami, w tym WPC, konieczne jest zdefiniowanie właściwości nie tylko osnowy polimerowej, ale także napełniacza drzewnego oraz jego rozmieszczenia w określony sposób, wynikający m.in. z geometrii wytworu, a także parametrów

technologicznych procesu [7]. Bardzo ważny jest kierunek ułożenia napełniacza, który determinuje anizotropowe właściwości. W kompozytach, gdzie jego udział jest znaczny, nie można tego faktu pominąć.

Niejednorodność kompozytów

Niejednorodność struktury kompozytów to problem nie tylko przetwórczy i konstrukcyjny, ale także obliczeniowy. Jednym z jego rozwiązań jest modelowanie mikromechaniczne, pozwalające przewidywać interakcje pomiędzy mikro- oraz makrostrukturą materiałów.

W modelowaniu numerycznym heterogeniczne ciało stałe traktuje się jak mikrostrukturę złożoną z osnowy i fazy wypełniacza, którą poddaje się obciążeniom zdefiniowanym za pomocą warunków brzegowych. Obliczeniom do zagadnienia podchodzi się od skali mikro-, w której definiuje się niejednorodność materiału, do makroskopo-wej – uważanej za całościowo jednorodną. Związek między tymi dwoma skalami ustala się za pomocą reprezentatywnego elementu objętościowego (REO lub RVE – *representative volume element*). Pojęcie to oznacza najmniejszą objętość rozważanego ośrodka, która zawiera wszystkie informacje potrzebne do kompletnego opisu struktury i właściwości całego materiału.

Celem homogenizacji jest sformułowanie dla zadanego ośrodka niejednorodnego równoważnego mu w sensie „uśrednionego zachowania” ośrodka jednorodnego. Bardzo popularne uśrednienia są oparte na metodach elementów skończonych i elementów brzegowych. Innym przybliżeniem jest zastosowanie homogenizacji metodą uśrednionego pola (*mean-field homogenization* – MFH), w której w przybliżony sposób oblicza się średnie obszary naprężeń i odkształceń na poziomie makro REO dla każdej fazy. Jednak ten model homogenizacji nie rozwiązuje problemu REO szczegółowo, tj. nie definiuje elementarnych naprężeń i odkształceń w skali mikro dla każdej fazy.

Jednym z najczęściej stosowanych numerycznych modeli homogenizacji jest model Mori-Tanaka, w którym tensor odkształcenia wszystkich wtrąceń – przy średniej wielkości ich odkształcenia w stosunku do średnich wielkości odkształcenia osnowy – jest równy tensorowi koncentracji odkształcenia dla pojedynczego wtrącenia [8, 9]. Taka homogenizacja jest efektywna, zwłaszcza w przewidywaniu właściwości kompozytów dwufazowych o ilości napełniacza do 25% (a w praktyce nawet wyższej).

Badania własne

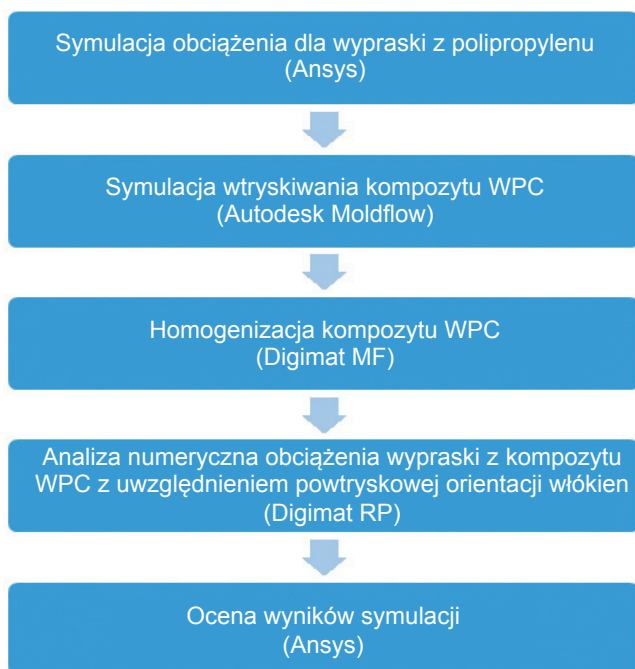
■ **Cel i zakres badań.** Celem podjętych badań było określenie zgodności charakterystyki wytrzymałościowej kompozytu polimerowego otrzymanej eksperymentalnie

* Dr hab. inż. Wiesław Frącz (wf@prz.edu.pl), mgr inż. Grzegorz Janowski (gjan@prz.edu.pl) – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

z charakterystyką otrzymaną w wyniku analiz numerycznych przeprowadzonych metodą homogenizacji uśrednionego pola z uwzględnieniem heterogenicznych właściwości kompozytu. Badania przeprowadzono na przykładzie kompozytu typu drewno-polimer. Zgodność charakterystyki z danymi eksperymentalnymi pozwoli, w pewnym zakresie, dokładnie obliczać wytrzymałość wytworów kompozytowych, m.in. dla zmiennej zawartości napełniacza włóknistego, zróżnicowanej geometrii wytworu oraz zmiennych parametrów technologicznych.

Z myślą o stosunkowo prostej weryfikacji eksperymentalnej wykonano analizy wytrzymałościowe geometrii próbek używanych w teście jednoosiowego rozciągania.

Algorytm obliczeń wytrzymałościowych z wykorzystaniem metody homogenizacji Mori-Tanaka przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Algorytm obliczeń wytrzymałościowych przeprowadzonych z uwzględnieniem heterogenicznej struktury kompozytu WPC

■ **Symulacja „odniesienia” statycznej próby rozciągania dla czystego polipropylenu.** Model geometryczny próbki zaprojektowano w programie NX8. Model ten zdyskretyzowano elementami skończonymi typu 3D. Obliczenia wykonano w programie Ansys 15. Przy pierwszej ewaluacji testu rozciągania uwzględniono dane materiałowe jedynie dla osnowy polimerowej, tj. dla Moplen HP648T. Przed wykonaniem symulacji zdefiniowano również warunki brzegowe. Model próbki został unieruchomiony na jednym końcu. Po przeciwnej stronie zadano kierunkowe przemieszczenie. Wykonano wstępną symulację. Dane dotyczące warunków brzegowych oraz zdyskretyzowany model próbki wyeksportowano do programu Digimat.

■ **Symulacje numeryczne wtryskiwania kompozytu WPC.** W celu uzyskania informacji o heterogenicznej strukturze wykonano symulację numeryczną procesu wtryskiwania kompozytu WPC w programie Autodesk Moldflow Insight 2013. Ważnym etapem poprzedzającym obliczenia było wprowadzenie do programu danych opisujących właściwości przetwarzanego kompozytu, m.in. właściwości cieplne i reologiczne tworzywa polimerowego oraz napełniacza drzewnego.

W symulacjach uwzględniono warunki procesu wtryskiwania adekwatne do stosowanych w eksperymencie. Obliczenia wykonano dla kompozytu WPC złożonego z osnowy polipropylenowej HP648T oraz 15% włókna drzewnego. Otrzymano m.in. prawdopodobny rozkład włókien wypełniacza drzewnego w osnowie polimerowej opisany za pomocą wskaźnika orientacji. Wskaźnik ten (składowa tensora orientacji) obrazuje prawdopodobieństwo ułożenia włókien na kierunkach głównych, m.in. wzdłuż kierunku przepływu kompozytu. Duże prawdopodobieństwo ułożenia włókien na danym kierunku określa składowa tensora orientacji o wartości bliskiej 1. Orientację włókien wyeksportowano do programu Digimat z wykorzystaniem makra wbudowanego w programie Autodesk Moldflow Insight.

■ **Homogenizacja metodą uśrednionego pola.** Oprogramowanie Digimat jest nieliniową, wieloskalową platformą modelowania materiałów i struktur, składającą się z kilku głównych modułów. W pracy wykorzystano moduł Digimat MF do analiz uśrednionych pól homogenizacji w celu przewidywania konstytutywnych, nieliniowych zachowań materiałów kompozytowych. Digimat zawiera różnorodne modele mikromechaniczne materiałów, które mogą być przypisane do każdej fazy mikro.

Do homogenizacji właściwości heterogenicznych kompozytu wykorzystano metodę Mori-Tanaka. Wieloskalowe modelowanie [10, 11] tego typu jest połączone z obliczeniami właściwości materiału lub zachowania systemu na jednym poziomie z użyciem informacji lub modeli pobranych z innych poziomów. W analizie dwuskalowej skala mikro, reprezentująca mikrostrukturę kompozytu, jest analizowana za pomocą homogenizacji uśrednionego pola. W skali makro zaś stosuje się metodę elementów skończonych, uwzględniającą zastępcze właściwości materiału. Metodę tę wybrano do oszacowania właściwości mechanicznych kompozytu WPC.

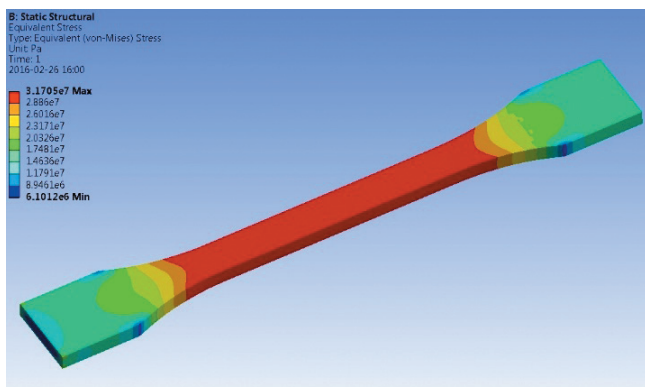
■ **Definicja materiału w programie Digimat MF.** Nieliniowy model kompozytu WPC zdefiniowano w programie Digimat MF. Założono model sprężysto-plastyczny dla osnowy polimerowej oraz sprężysty dla wypełnienia w postaci włókna drzewnego – z racji szerokiego zastosowania tych modeli do opisu właściwości kompozytów o osnowie polimerowej [11÷13]. Wprowadzono dane wytrzymałościowe i fizyczne dotyczące polimeru oraz włókna, m.in.: moduł Younga, współczynnik Poissona, granicę plastyczności, gęstość. Zdefiniowano fazy kompozytu, tj. osnowę polimerową oraz napełniacz, dla którego wprowadzono wartości składowe tensora orientacji: a_{11} , a_{22} , a_{33} , stosunek długości do średnicy włókna oraz zawartość objętościową wypełnienia.

Przeprowadzono homogenizację, w wyniku której otrzymano charakterystykę właściwości kompozytu WPC. Wykorzystano ją w dalszych obliczeniach wytrzymałościowych kompozytu.

■ **Modelowanie numeryczne statycznej próby rozciągania.** W celu przeprowadzenia analizy numerycznej statycznej próby rozciągania dla kompozytu WPC z uwzględnieniem właściwości dwufazowej struktury materiału, w tym powtryskowej orientacji włókien, wykorzystano program Digimat RP. Przygotowanie danych do obliczeń przebiegało w trzech etapach. W pierwszej kolejności importowano dane z programu Ansys dotyczące warunków brzegowych dla próby rozciągania i model zdyskretyzowanej próbki, wykonany dla wcześniejszej

analizy uwzględniającej tylko osnowę polimerową. Następnie zaimportowano dane materiałowe kompozytu WPC zdefiniowane w programie Digimat MF. Ostatnim etapem był import modelu geometrycznego wypraski z programu Autodesk Moldflow oraz danych dotyczących orientacji włókien. Wykonano m.in. transfer danych dotyczących orientacji włókien po symulacji procesu wtryskiwania na wcześniejszy model z analizy wytrzymałościowej w programie Ansys.

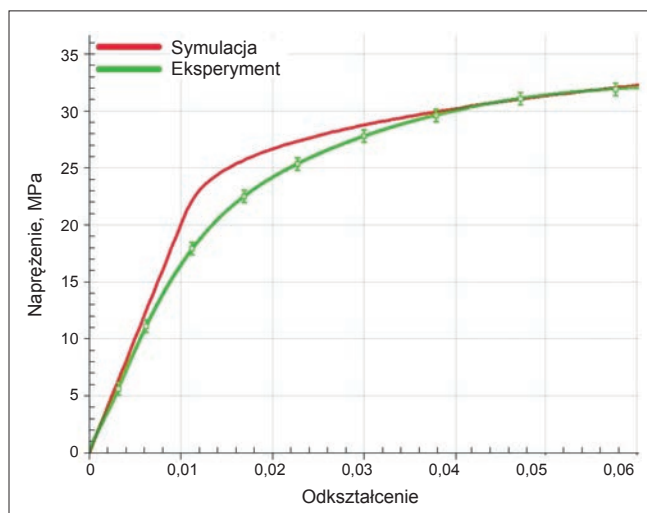
Wykonano analizę numeryczną statycznej próby rozciągania dla kompozytu WPC z zadaniem warunków brzegowych z poprzedniej analizy, z uwzględnieniem powtryskowej orientacji włókien i danych materiałowych dwufazowego kompozytu. Obliczenia przeprowadzono w programie Digimat RP z wykorzystaniem solvera oprogramowania Ansys. To umożliwiło bezpośrednią analizę wyników symulacji w programie Ansys (rys. 2).



Rys. 2. Wyniki analizy numerycznej dotyczącej testu jednoosiowego rozciągania w programie Ansys 15

Badania eksperymentalne

Aby zweryfikować obliczenia, wykonano badania eksperymentalne. Wytworzono kompozyt WPC na bazie tworzywa Moplen HP648T jako osnowy oraz 15% włókna drzewnego firmy Rettemaier, typu Lignocel C120. Właściwości przetwórcze kompozytu WPC określono w pracy [7]. Próbkę do rozciągania zostały wykonane na wtryskarce Dr Boy E55. Statyczną próbę rozciągania zrealizowano na maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z100. W badaniach wytrzymałościowych, przeprowadzonych zgodnie z normą PN ISO 527, przebadano 10 kompletów próbek



Rys. 3. Porównanie charakterystyk ze statycznej próby rozciągania uzyskanych eksperymentalnie oraz za pomocą obliczeń numerycznych

rozciąganych z prędkością 50 mm/min. Przykładową, reprezentatywną dla badanego kompozytu charakterystykę z testu rozciągania zamieszczono na rys. 3 wraz z charakterystyką otrzymaną w wyniku obliczeń w programie Digimat.

Uzyskano dużą zgodność charakterystyk w zakresie przede wszystkim dużych wartości odkształcenia. Największy błąd względny – wynoszący 15% – zaobserwowano dla odkształcenia równego 1,5%. Dla wartości odkształcenia mniejszych niż 0,5% oraz większych niż 3% stwierdzono dużą zgodność charakterystyki – na poziomie niższym niż 1%.

Wnioski

Program Digimat pozwala na zdefiniowanie właściwości materiałów heterogenicznych i tym samym uwzględnienie specyficznych właściwości kompozytów polimerowych. W obliczeniach wykorzystuje się etap homogenizacji właściwości. Powszechnie stosowany jest model Mori-Tanaka, który służy do opisywania nieliniowych właściwości kompozytów polimerowych. Modelowanie numeryczne z uwzględnieniem modelu Mori-Tanaka daje dobre przybliżenie właściwości kompozytu WPC w szerokim zakresie obciążenia. Nieco większe różnice w stosunku do danych eksperymentalnych występują w zakresie ok. 0,5÷1,5% charakterystyki odkształcenie–napężenie. Wynika to z przyjętego modelu materiału.

Badania zrealizowano w ramach People Programme (Marie Curie International Research Staff Exchange) of the European Union's Seventh Framework Programme FP7/2007-2013/ – grant n° PIRSES.

LITERATURA

- Kim J.K., Pal K. "Recent advances in the processing of wood-plastic composites". Berlin: Springer, 2010.
- Bhaskar J., Haq S., Yadaw S.B. "Evaluation and testing of mechanical properties of wood plastic composite". *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. Vol. 24, No. 4 (2011): pp. 391-401.
- Ashori A. "Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!". *Bioresource Technology*. Vol. 99, No. 11 (2008): pp. 4661-4667.
- Mroziński A. "Problemy recyklingu tworzyw polimerowych". *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*. R. 49, nr 5 (2010): s. 89-90.
- Żuchowska D., Steller R., Meissner W. "Kompozyty polimerowe podatne na (bio)degradację". *Polimery*. R. 52, nr 7-8 (2007): s. 524-531.
- Henczkowski M., Kawa M. "Optymalizacja wtrysku wspomaganego gazem z wykorzystaniem symulacji procesu w programie Autodesk Moldflow Insight". *Mechanik*. R. 88, nr 4 (2015): s. 285-287.
- Frącz W., Janowski G. "Ocena możliwości wtryskiwania kompozytu WPC w produkcji elementów wyposażenia wnętrza autobusu w oparciu o symulacje numeryczne procesu". *Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*. R. 16, nr 7-8 (2015): s. 48-52.
- Ogierman W., Kokot G. "Mean field homogenization in multi-scale modelling of composite materials". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 61, No. 2 (2013): pp. 343-348.
- Czyż T., Dziatkiewicz G., Fedeliński P., Górski R., Ptaszny J. "Advanced computer modelling in micromechanics". Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
- Perdahcioğlu E.S., Geijselaers H.J. "Constitutive modeling of two phase materials using the mean field method for homogenization". *International Journal of Material Forming*. Vol. 4, No. 2 (2011): pp. 93-102.
- DIGIMAT software documentation. e-Xstream engineering. 2015.
- Doghri I., Brassart L., Adam L., Gérard J.S. "A second-moment incremental formulation for the mean-field homogenization of elasto-plastic composites". *International Journal of Plasticity*. Vol. 27, No. 3 (2011): pp. 352-371.
- Landervik M., Jergeus J. "Digimat Material Model for Short Fiber Reinforced Plastics at Volvo Car Corporation". *In European LS-DYNA Conference*. Conference materials. Würzburg, Germany: 2015. ■