

Wiesław FRĄCZ, Grzegorz JANOWSKI, Grażyna RYZIŃSKA
Politechnika Rzeszowska, Katedra Przeróbki Plastycznej, ul. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów,
e-mail: wf@prz.edu.pl

Badania wpływu struktury napełniacza na parametry tworzywa w formie w procesie niskociśnieniowego formowania laminatów w oparciu o symulacje numeryczne

Streszczenie: W pracy wykonano symulacje numeryczne procesu niskociśnieniowego przesycania napełniacza w zamkniętych formach (ang. RTM) dla dwóch rodzajów napełniacza: maty z włókna szklanego typu S o nazwie handlowej OCF M8610 oraz tkaniny z włókna szklanego typu E w gatunku Cofab A1118B przy zachowaniu jednakowych parametrów technologicznych. Właściwości włókien ustalono na podstawie przeglądu literatury. Właściwości samego napełniacza obliczono w programie Digimat FE. W celu obliczenia przepływu żywicy (żywica poliestrowa Arotran Q6055) wyznaczono porowatość oraz przepuszczalność napełniacza. Symulacje procesu RTM przeprowadzono w programie Autodesk Moldflow Insight 2013 dla modelu fotela pasażera pojazdu komunikacji miejskiej. Przeanalizowano m. in. temperaturę, ciśnienie oraz stopień utwardzenia żywicy w gnieździe formy w zależności od rodzaju napełniacza. **Słowa kluczowe:** proces RTM, symulacje numeryczne, program Digimat, Moldflow Insight, kompozyty szklane (GFRP)

THE ANALYSIS OF REINFORCEMENT EFFECT ON PARAMETERS IN THE MOLD CAVITY FOR RESIN TRANSFER MOLDING PROCESS BASED ON NUMERICAL SIMULATIONS

Abstract: In this work the advanced numerical analyses of the RTM process for two types of reinforcement (OCF M8610 mat made from fiberglass of S type and Cofab A1118B fabric made from glass fibers of E type) were performed. The analyses were made with the same type of polyester resin (Arotran Q6055 type) and at identical process parameters. The basic properties of fibers were determined on the basis of literature review. The properties of the reinforcement were determined on the basis of calculations by means of Digimat FE software. To calculate the resin flow the porosity and permeability of the reinforcement were determined. The RTM process simulations were performed by means of Autodesk Moldflow Insight 2013 commercial code for the passenger seat used in vehicle of public transport. The temperature, pressure and bulk conversion of the resin in the mold cavity depending on the type of reinforcement were taking into account.

Keywords: RTM, numerical simulations, Digimat software, Moldflow Insight, glass fiber composites (GFRP)

WPROWADZENIE

Wytwarzanie wytworów kompozytowych za pomocą technologii niskociśnieniowego przesycania żywicą w zamkniętych formach (ang. Resin Transfer Moulding – RTM) jest jednym z najbardziej stosowanych procesów wytwarzania z użyciem żywic utwardzalnych. Technologia ta polega na przesycaniu żywicą warstw napełniacza ułożonych na sucho w zamkniętych formach pokrytych żelkotem [1,2].

Przeprowadzenie analiz numerycznych tego procesu jest zagadnieniem wymagającym znajomości wielu zjawisk oraz określenia szczegółowych właściwości materiałowych. Nie tylko rodzaj zastosowanej żywicy [3] oraz znajomość optymalnych parametrów procesu jest w tym przypadku istotna. Istnieje wiele innych dodatkowych czynników determinujących ten proces. Są to m.in. rodzaj napełniacza jego przepuszczalność, porowatość oraz udział objętościowy. W pracy wykonano zaawansowaną symulację

numeryczną procesy RTM dla dwóch rodzajów napełniacza z włókien szklanych: maty z włókna typu S o nazwie handlowej OCF M8610 oraz tkaniny z włókna typu E w gatunku Cofab A1118B, przy zachowaniu tego samego rodzaju żywicy poliestrowej oraz przy identycznych parametrach procesu. Podstawowe dane dotyczące włókien napełniacza ustalono na podstawie przeglądu literatury [4÷10]. Z uwagi na brak dużej ilości danych dotyczących właściwości napełniacza wykonano analizy mikrostrukturalne w programie Digimat a w niektórych przypadkach również aproksymację istniejących danych. Wykonanie zaawansowanych analiz numerycznych procesu oraz analiza wyników symulacji pozwoliła wstępnie przedstawić kompleksowe ujęcie problemów technologii RTM.

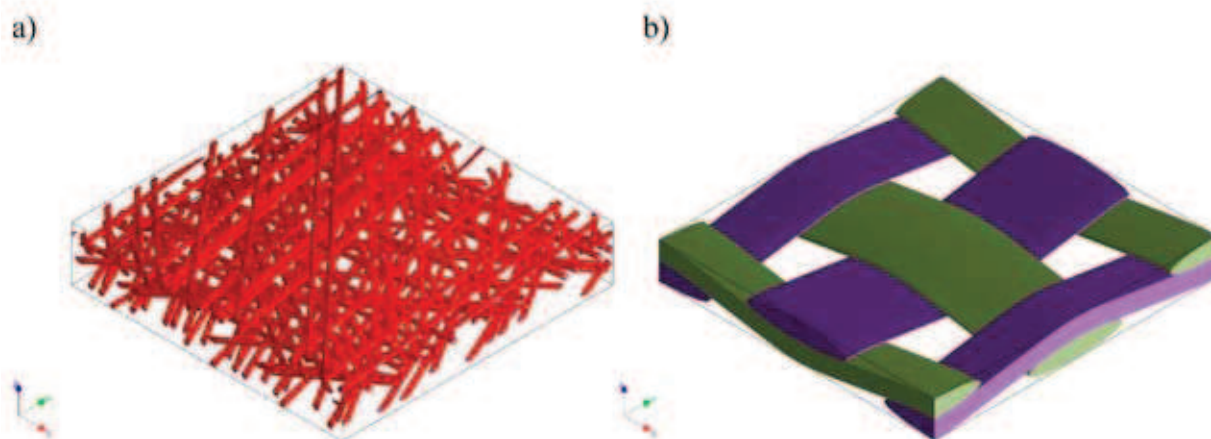
PROGNOZOWANIE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH KOMPOZYCJI

W celu określenia zawartości objętościowej włókna szklanego w warstwie napełniacza przeprowadzono obliczenia mikrostrukturalne dla w/w rodzajów napełniacza przesyconych żywicą poliestrową, z wykorzystaniem oprogramowania Digimat FE [11]. Podstawowe właściwości kompozytów (gramatura, gęstość włókna, ro-

dziej splotu) określono na podstawie analizy literatury [4÷10]. Umożliwiły one przeprowadzenie podstawowych obliczeń i wykonanie wizualizacji mikrostruktury (rys. 1). Zdolność żywicy do przesykania napełniacza zależy wszak głównie od jego właściwości, w tym przede wszystkim od geometrii.

Wyznaczenie właściwości dla maty przebiegało dwuetapowo. W pierwszym etapie wykonano obliczenia mikrostrukturalne dla jednej wiązki rovingu szklanego, dla włókna typu S o grubości 140 μm [7]. Następnie wprowadzono do programu dane materiałowe obliczone dla przędzy, co umożliwiło wykonanie kalkulacji dla fragmentu maty, na podstawie czego ustalono jej właściwości wytrzymałościowe. Obliczenia dla tkaniny wykonano w inny sposób. W pierwszej kolejności określono parametry geometryczne wiązki oraz osnowy składającej się z włókien typu E [4÷5, 9÷10].

Następnie określono splot tkaniny i przeprowadzono końcowe obliczenia. Jednym z parametrów wynikowych dla tkaniny była gramatura, której wartość (593 g/m^2) potwierdza wysoką zgodność z danymi producenta (610 g/m^2) [4]. Istotnym parametrem dla przeprowadzenia analizy numerycznej procesu RTM jest również zawartość objętościowa lub masowa włókna szklane-



Rys. 1. Wizualizacja analizowanych struktur napełniacza przesyconych żywicą poliestrową: a) dla maty, b) dla tkaniny
Fig. 1. Visualization of the structures saturated by polyester resin: a) for mat, b) for fabric

go. Na podstawie obliczeń mikrostrukturalnych w programie Digimat określono zawartość objętościową włókien dla obydwu przypadków napelnacza. Otrzymane w wyniku obliczeń dane materiałowe dla analizowanych rodzajów napelnacza zestawiono w Tab. 1. Dane te wykorzystano do symulacji numerycznej procesu RTM.

nikania przez niego płynów i stanowi miarę zdolności ośrodka porowatego do transportowania przez niego cieczy [4, 12÷14].

Znajomość porowatości oraz przepuszczalności jest bardzo istotna dla napelnacza stosowanego w procesie RTM. Porowatość określana jest zależnością [4]:

Tab. 1. Właściwości analizowanych kompozycji: mata – żywica poliestrowa i tkanina – żywica poliestrowa obliczone za pomocą programu Digimat

Tab. 1 The properties of analysed composition for: mat – polyester resin and fabric – polyester resin, calculated by means of Digimat software

Właściwości	Mata z włókna szklanego typu S	Tkanina z włókna szklanego typu E
Udział objętościowy napelnacza w kompozycie dla grubości jednej warstwy	0,12	0,24
Gęstość [kg/m ³]	1282,83	1947,38
Moduł Younga E1 [MPa]	9745,89	13217,4
Moduł Younga E2 [MPa]	9568,16	13508,7
Moduł Younga E3 [MPa]	6586,12	8057,59
Współczynnik Poissona v12	0,329852	0,19908
Współczynnik Poissona v21	0,323837	0,203468
Współczynnik Poissona v13	0,417411	0,472369
Współczynnik Poissona v31	0,28208	0,287965
Współczynnik Poissona v23	0,423152	0,467455
Współczynnik Poissona v32	0,291271	0,278825
Moduł Kirchhoffa G12 [MPa]	3059,64	2546,96
Moduł Kirchhoffa G23 [MPa]	1857,9	2328,1
Moduł Kirchhoffa G13 [MPa]	1849,61	2341,97

POROWATOŚĆ I PRZEPUSZCZALNOŚĆ NAPEŁNIACZA

W przypadku napelnacza stosowanego w procesie RTM istotne znaczenie mają wartości jego porowatości oraz przepuszczalności. Porowatość jest parametrem określającym wielkość pustych przestrzeni wewnątrz materiału, które mogą zostać wypełnione gazem bądź cieczą. Jest ona również definiowana jako stosunek objętości pustych obszarów do całkowitej objętości materiału. Z kolei przepuszczalność określa zdolność materiału do prze-

$$\phi = 1 - \frac{n\xi}{t\rho_f} \quad (1)$$

gdzie:

- ϕ – porowatość,
- n – całkowita liczba warstw napelnacza,
- ξ – gramatura,
- t – grubość gniazda formującego,
- ρ_f – gęstość włókna szklanego.

Zależność (1) została wykorzystana do obliczeń porowatości analizowanej maty oraz tkaniny. Wielkości wejściowe oraz wyniki obliczeń porowatości zestawiono w Tab. 2.

Tab. 2. Dane do obliczeń i wartości porowatości dla maty oraz tkaniny

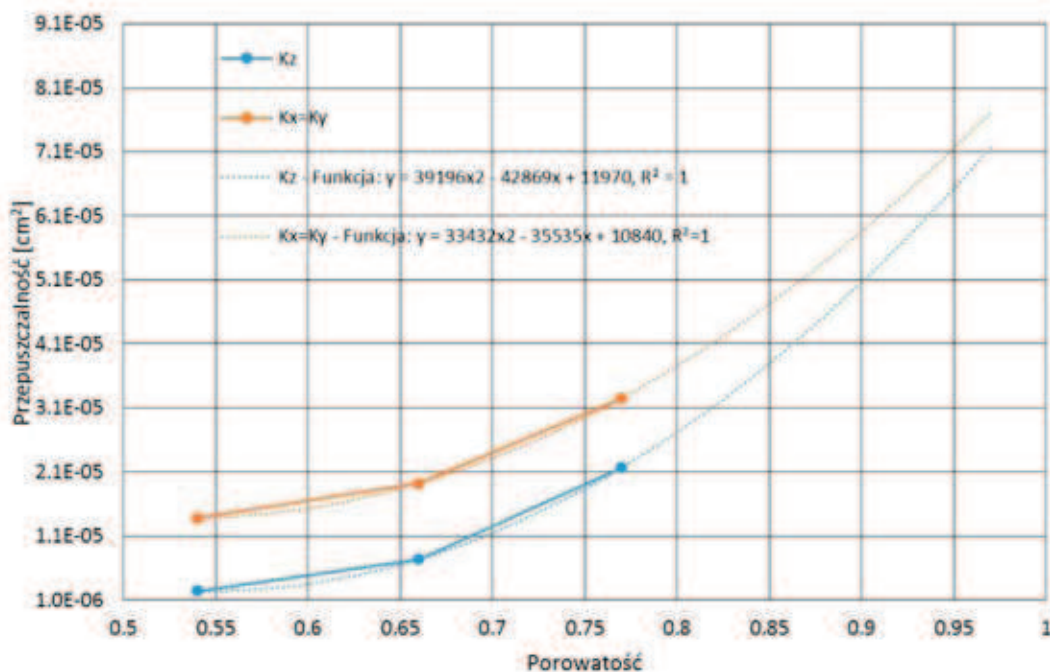
Tab. 2. The data to evaluate porosity of the mat and fabric and calculation results

Właściwości napełniacza	Maty	Tkanina
Gramatura napełniacza [g/m ²]	450	610
Gęstość włókna szklanego [kg/m ³]	2490	2560
Grubość laminatu [m]	0,003	0,003
Grubość pojedynczej warstwy napełniacza [m]	0,0015	0,00096
Liczba warstw napełniacza w laminacie [-]	2	3
Grubość warstw napełniacza [m]	0,003	0,00288
Porowatość wg (1)	0,879	0,762

Wartości przepuszczalności (K_x , K_y , K_z) dla obydwóch rodzajów napełniacza, na kierunkach osi układu współrzędnych, określono na podstawie określonych dla nich eksperymentalnie wartości porowatości [4]. Dla maty założono jednakową przepuszczalność we wszystkich kierunkach warstwy napełniacza ($K_x = K_y$) a różną na kierunku grubości (K_z). Dla anizotropowej tkaniny obliczono wartości przepuszczalności dla każdego kie-

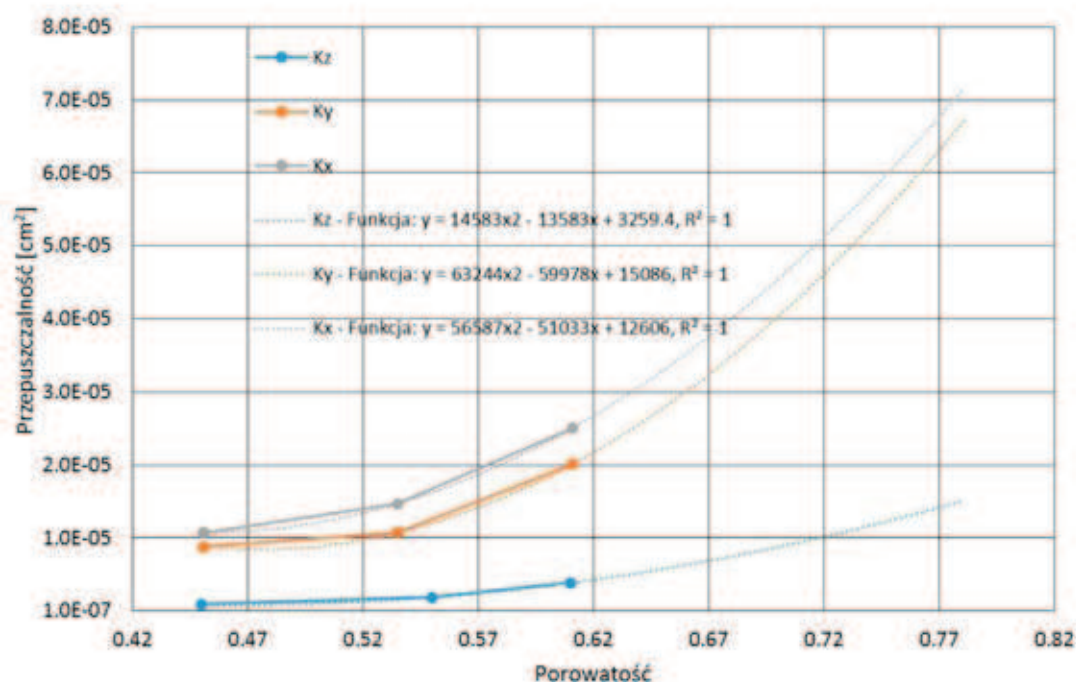
runku osobno. Potrzebne jednak do obliczeń wartości porowatości wykraczały poza zakres danych eksperymentalnych zamieszczonych w literaturze. Istniejące dane aproksymowano za pomocą wielomianów drugiego stopnia. Wyznaczono równania wielomianów dla krzywych trendu oraz wykreślono charakterystyki przepuszczalności (rys. 2, rys. 3).

Obliczone wartości przepuszczalności dla maty i tkaniny zestawiono w Tab. 3.



Rys. 2. Wykresy zależności przepuszczalności w funkcji porowatości dla maty

Fig. 2. The graphs of the permeability as a function of the porosity of the mat



Rys. 3. Wykresy zależności przepuszczalności w funkcji porowatości dla tkaniny

Fig. 3. The graphs of the permeability as a function of the porosity of the fabric

Tab. 3. Porowatość i przepuszczalność maty OCF M8610 oraz tkaniny Cofab A1118B

Tab. 3. Porosity and permeability of the of OCF M8610 mat and Cofab A1118B fabric

Kierunek	Porowatość [0-1]	Przepuszczalność [m ²]	Porowatość [0-1]	Przepuszczalność [m ²]
	Mata		Tkanina	
K_x	0,879	0,538	0,762	0,648
K_y	0,879	0,538	0,762	0,602
K_z	0,879	0,453	0,762	0,136

ANALIZA NUMERYCZNA PROCESU RTM

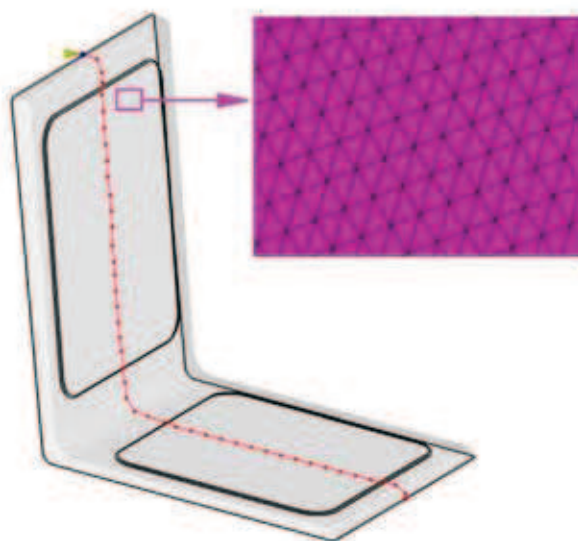
Określenie właściwości napelnacza pod kątem przesycania żywicą dało możliwość wykonania symulacji numerycznych procesu kształtowania wytworu. W prezentowanej pracy wykonano symulację numeryczną procesu RTM wytwarzania fotela pasażera pojazdu komunikacji miejskiej (Rys. 4) o wymiarach 0,610 x 0,458 x 0,565 m i grubości 0,003 m. Jako osnowę polimerową kompozytu wybrano do symulacji żywicę poliestrową w gatunku Arotran Q6055,

powszechnie stosowaną w produkcji elementów z kompozytów polimerowych [15÷16]. Przeprowadzono dwie analizy numeryczne procesu dla maty OCF M8610 oraz tkaniny Cofab A1118B, dla identycznych parametrów technologicznych, tj.: czasu dozowania żywicy (25s), temperatury formy (120°C) oraz temperatury wtryskiwanej żywicy (40°C). Parametry te ustalono za pomocą optymalizacji metodą Taguchi [16]. Symulacje wykonano w programie Autodesk Moldflow Insight 2013. Model numeryczny wytworu zbudowano w technologii Dual Domain, za pomocą

ok. 110 tys. elementów skończonych (ES) typu cienka powłoka. Brakujące dane do symulacji uzyskano na podstawie analizy literatury [4–10, 16]. Szczegółowe wyniki dotyczące parametrów stanu tworzywa w formie określono dla 45-ciu węzłów siatki ES, usytuowanych wzdłuż przekroju fotela, przedstawionego na rysunku 4.

a następnie wzrasta. W praktyce należy pamiętać, że dłuższy czas utwardzania gwarantuje większą żywotność wytworu oraz odporność na wyższe temperatury użytkowania.

Dla obydwu symulacji początek I etapu utwardzenia obliczono dla czasu 112,5s, co wydaje się świadczyć o tym, iż analizy zostały wykonane



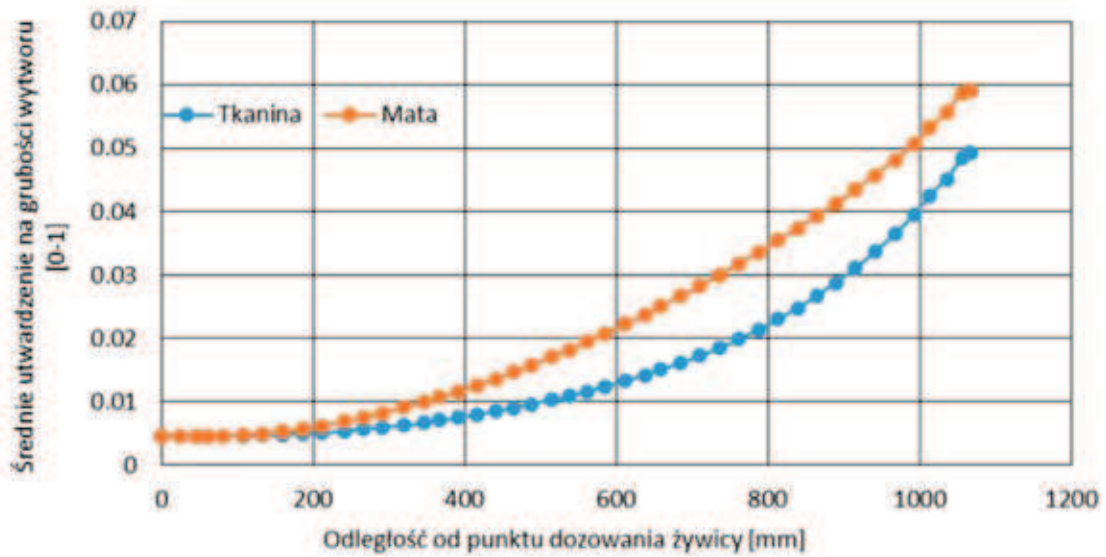
Rys. 4. Model numeryczny fotela wraz z zaznaczonym przekrojem oraz fragmentem siatki ES

Fig. 4. The numerical model of analyzed seat with marked out the section and with FE mesh detail

INTERPRETACJA WYNIKÓW SYMULACJI

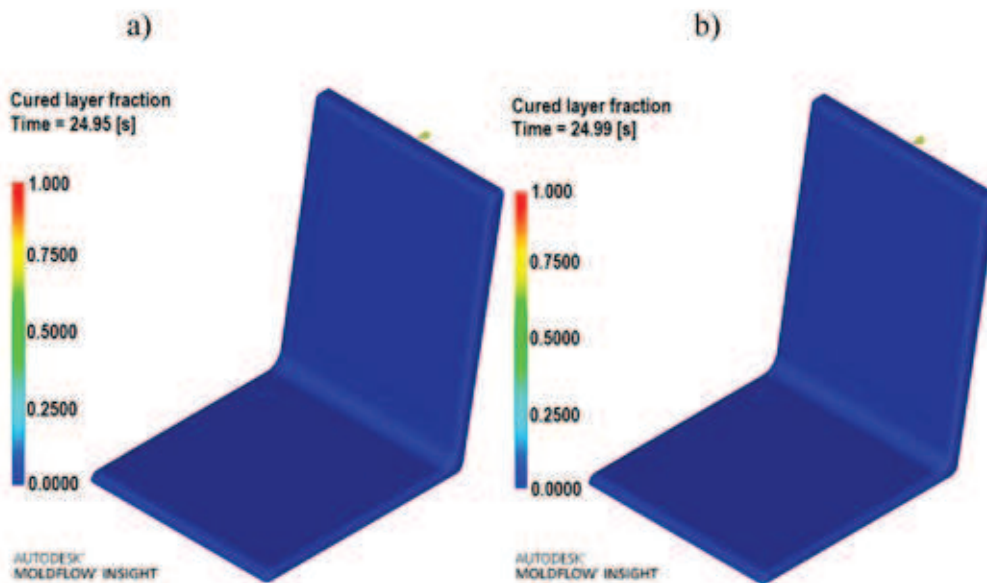
Przedwczesne usieciowanie żywicy jest standardowym problemem technologicznym w procesie niskociśnieniowego przesycania napelnacza żywicą. Wiadomo ze źródeł [17], że zjawisko to występuje, gdy lepkość żywicy wzrasta istotnie, w wyniku podwyższenia temperatury, przed osiągnięciem I-go etapu utwardzania. Zauważalne jest również wtedy przyspieszenie przepływu żywicy, co w konsekwencji skutkuje silnym jego wahaniem. Po podgrzaniu żywicy do wyższej temperatury lepkość zmniejsza się gwałtownie,

przy prawidłowych parametrach procesu. Świadczą o tym również małe wartości (0,005–0,06) utwardzenia na grubości wytworu przy końcu całkowitego wypełnienia formy żywicą (ang. bulk conversion – rys. 5) oraz udział warstw utwardzonych żywicy po założonym czasie wtrysku (ang. cured layer fraction – rys. 6). Udział warstw utwardzonych przedstawia obszary wytworu, w których obserwuje się wstępne utwardzenie żywicy. Większy opór jej przepływu świadczy o większym udziale warstw utwardzonych w wyrobie. W trakcie wypełniania gniazda formującego udział warstw utwardzonych zwiększa się



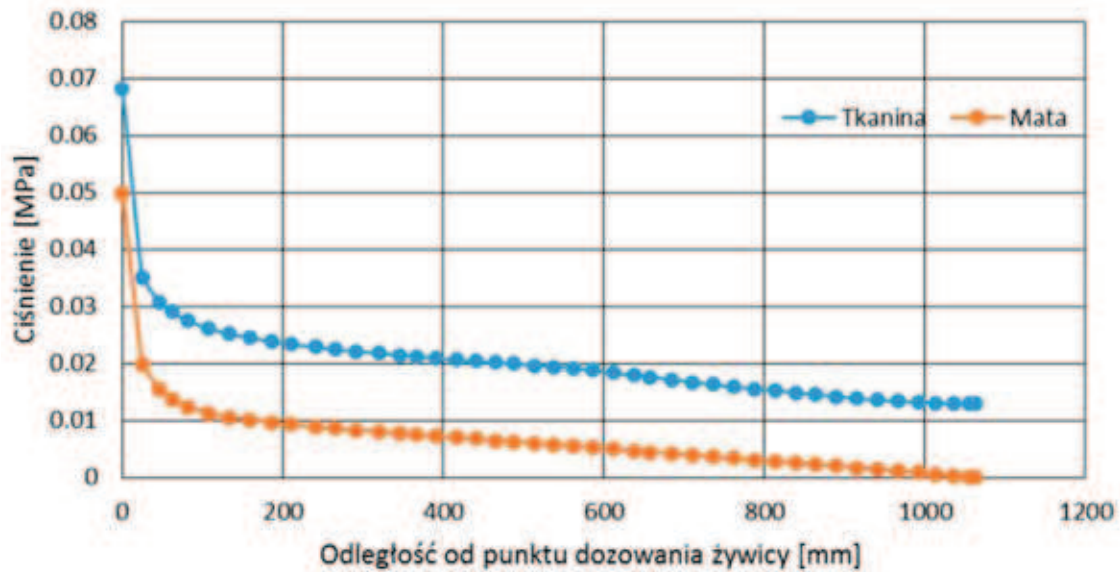
Rys. 5. Średnie utwardzenie na grubości wytworu na koniec fazy wypełniania w funkcji odległości od punktu dozowania żywicy

Fig. 5. Bulk conversion at end of fill as a function of the distance from the resin injection point



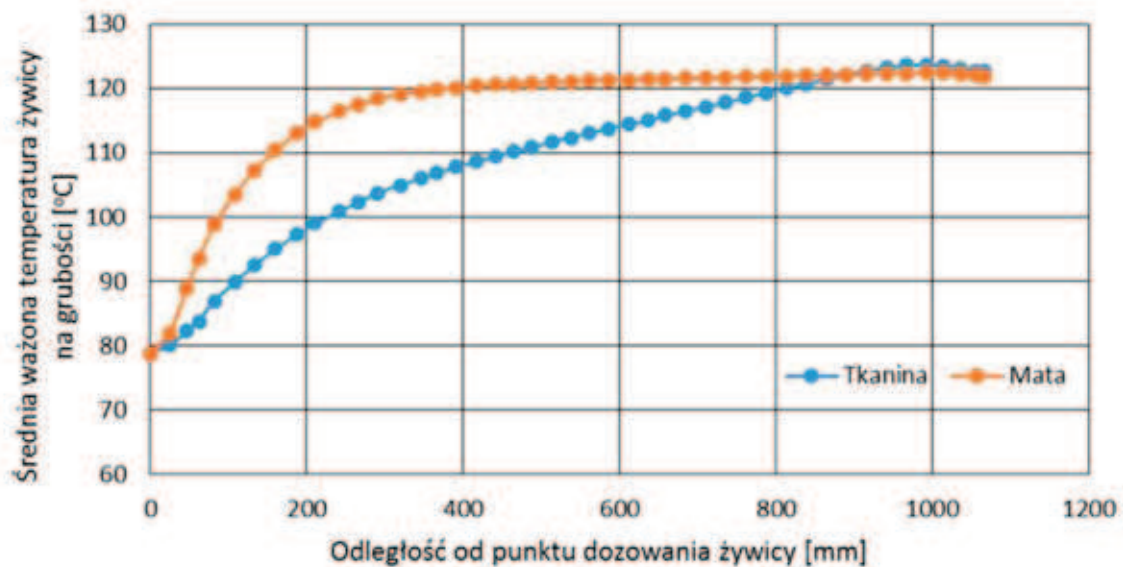
Rys. 6. Udział warstw utwardzonych po czasie 25 s :
a) dla napelnacza z maty, b) dla napelnacza z tkaniny

Fig. 6. Cured layer fraction after 25 sec. for: a) reinforcement made from mat, b) reinforcement made from fabric



Rys. 7. Spadek ciśnienia w gnieździe formy w funkcji odległości od punktu dozowania żywicy

Fig. 7. Pressure drop in mold cavity as a function of the distance from the injection resin



Rys. 8. Średnia ważona temperatura żywicy na grubości w funkcji odległości od punktu dozowania żywicy

Fig. 8. Bulk temperature as a function of the distance from the injection of resin

bardziej w obszarach, gdzie przepływ już ustał, w przeciwieństwie do obszarów, gdzie przepływ trwa nadal. Zgodnie z zasadą ogólną, żywice utwardzalne powinny osiągnąć co najmniej 80% utwardzenia na koniec procesu, jednakże w przypadku mniej kosztownych wytworów, w zależności od rodzaju żywicy, często dopuszcza się poziom utwardzenia ok. 50% a nawet i mniejszy [17].

RTM jest procesem niskociśnieniowym, w którym obserwuje się również niewielki spadek ciśnienia żywicy wraz ze wzrostem odległości od miejsca jej dozowania. Analizując otrzymane wyniki (rys. 7) zauważyć można spadek wartości ciśnienia dla obu przypadków napełniacza, jednak spadek ciśnienia dla tkaniny Cofab A1118B jest wyższy. Wynika to z większej zawartości objętościowej włókna oraz mniejszej porowatości tego napełniacza, co powoduje większe opory przepływu żywicy. W przypadku obydwu rodzajów napełniacza na większym obszarze gniazda formującego utrzymuje się ciśnienie rzędu setnych części megapaskala, co może sugerować pewność uzyskania poprawnych właściwości wytworu.

Temperatura uplastycznionego polimeru zależy nie tylko od czasu i położenia analizowanego obszaru w gnieździe, ale również od odległości analizowanej warstwy kompozytu od jego warstwy środkowej. Dla zobrazowania tak powiązanych zależności może służyć wartość średniej ważonej temperatury żywicy na grubości (ang. bulk temperature). Jeżeli maksymalna jej wartość jest zbliżona do temperatury degradacji polimeru należy wykonać zmianę konstrukcyjną gniazda formującego, bądź zoptymalizować parametry procesu. Duża zmiana tej wartości wzdłuż kierunku przepływu może powodować nierównomierny skurcz oraz deformacje kształtu wytworu [17]. Na rysunku 8 przedstawiono wykres średniej ważonej temperatury żywicy na grubości wytworu w funkcji odległości od punktu dozowania żywicy po całkowitym wypełnieniu gniazda. Jak widać na początku

drogi przepływu żywicy w gnieździe, dla wytworu zbrojonego tkaniną uzyskano niższe temperatury, natomiast w przypadku maty zauważalna jest mniejsza różnica temperatury między wypełnianymi obszarami gniazda.

PODSUMOWANIE

Szczegółowa analiza mikrostruktury kompozytu wykonana za pomocą programu Digimat FE pozwala obliczyć dane wejściowe niezbędne do symulacji przepływów żywicy, charakteryzujące właściwości napełniacza kompozytu (m. in. udział objętościowy napełniacza, porowatość, przepuszczalność).

Analiza numeryczna procesu RTM z uwzględnieniem obliczonych właściwości napełniacza pozwala dokładnie określić parametry tworzywa w formie oraz ustalić możliwość wykonania wyrobu kompozytowego przy zadanych parametrach technologicznych. Parametry te zależą od rodzaju napełniacza. Wyniki symulacji procesu RTM potwierdzają różnice w wartościach parametrów tworzywa w formie (np. ciśnienia wewnątrz gniazda formy). Dla tkaniny wartości spadku ciśnienia są wyższe, utrzymują się jednak na niewielkim poziomie. W przypadku obu analiz zauważono nieznaczne różnice w utwardzeniu żywicy na grubości wytworu na koniec fazy wypełniania. Pomimo tych różnic nie obserwuje się przedwczesnego utwardzenia żywicy. Wskazuje na to również brak warstw utwardzonych w momencie zakończenia fazy wypełniania formy.

BIBLIOGRAFIA

1. Potter K.: *Resin transfer moulding*. Chapman & Hall, London 1997.
2. Kozioł M., Hufenbach W., Czulak A., Małdachowska A.: *Ocena aplikacji płyt z laminatów na bazie wyplatanych preform z włókien szklanych wytwarzanych metodą RTM*. Przetwórstwo Tworzyw 2013, vol. 19, nr 1, 16–22.

3. Krzyżak A., Sikora J.: *Przetwarzalność tworzyw fenolowych wyznaczana metodą BIP*. Polimery 2007, vol. 52, nr 1, 44–50.
4. Trevino L., Rupel K., Young W. B., Liou M. J., Lee L. J.: *Analysis of resin injection molding in molds with preplaced fiber mats. I: Permeability and compressibility measurements*. Polymer composites 1991, vol. 12, nr 1, s. 20–29.
5. Yu B. M., Li J. H., Zhang D. M.: *A fractal trans-plane permeability model for textile fabrics*. International communications in heat and mass transfer 2003, vol. 30, nr 1, s. 127–138.
6. Hedley C. W.: *Mold filling parameters in resin transfer molding of composites*. Montana State University, Bozeman 1994.
7. Kim D. S., Macosko C. W.: *Reaction injection molding process of glass fiber reinforced polyurethane composites*. Polymer Engineering & Science 2000, vol. 40, nr 10, s. 2205–2216.
8. Dominguez R. J., Rice D. M.: *High strength continuous glass strand—polyurethane composites by the reaction injection molding process*. Polymer composites 1983, vol. 4, nr 3, s. 185–189.
9. Batch G. L., Cumiskey S., Macosko C. W.: *Compaction of fiber reinforcements*. Polymer composites 2002, vol. 23, nr 3, s. 307–318.
10. Yu B., James Lee L.: *A simplified in plane permeability model for textile fabrics*. Polymer Composites 2000, vol. 21, nr 5, s. 660–685.
12. DIGIMAT software documentation, e-Xstream engineering, 2015.
13. Verheus A. S., Peeters J. H. A.: *The role of reinforcement permeability in resin transfer moulding*. Composites Manufacturing 1993, vol. 4, nr 1, s. 33–38.
14. Pomeroy R., Grove S., Summerscales J., Wang Y., Harper A.: *Measurement of permeability of continuous filament mat glass-fibre reinforcements by saturated radial airflow*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2007, vol. 38, nr 5, s. 1439–1443.
15. Rodriguez E., Giacomelli F., Vazquez A.: *Permeability-porosity relationship in RTM for different fiberglass and natural reinforcements*. Journal of composite materials 2004, vol. 38, nr 3, s. 259–268.
16. Oleksy M., Heneczowski M., Budzik G.: *Application of computer simulation of thermoset resins casting in rapid prototyping techniques*. Polimery 2010, vol. 55, nr 11–12, s. 895–898.
17. Frącz, W., Janowski G.: *Analiza numeryczna procesu wytwarzania kompozytowego fotela pasażera miejskiego autobusu w technologii RTM*. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2016, vol.17, nr 5, s. 28–32.
18. Pomoc systemowa programu Autodesk® Moldflow® Insight 2013

PODZIĘKOWANIA

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-GA-2013–610547

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 05–04–2017

Data akceptacji publikacji do druku: 20–04–2017