

Modeling of fiber orientation in the injection molding process of short fiber-reinforced polymeric materials

Modelowanie orientacji włókien w procesie wtryskiwania kompozytów polimerowych



DOI: 10.15199/62.2024.12.9

Simulation studies of the injection molding process using various models of short glass fiber orientation and methods of mold model discretization for polyamide 6 with a glass fiber content of 50% were presented. The results of numerical tensile tests for simulated samples were compared with the results of exptl. strength tests. The effect of both the math. model and the type of finite element mesh on the accuracy of numerically detd. mech. properties of the injected product was found. The simulation studies were performed using Moldex3D and Cadmould programs.

Keywords: polymer injection molding, modeling, fiber orientation

Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych procesu wtryskiwania przy zastosowaniu różnych modeli orientacji krótkich włókien szklanych oraz różnych metod dyskretyzacji modelu wypraski z poliamidu 6 z 50-proc. zawartością włókien (PA6GF50). Wyniki numerycznych prób rozciągania dla symulowanych próbek zestawiano z wynikami doświadczalnych badań wytrzymałości. Stwierdzono wpływ zarówno modelu matematycznego, jak i typu siatki elementów skończonych na dokładność numerycznie wyznaczonych właściwości mechanicznych wtryskiwanego wyrobu. Badania symulacyjne przeprowadzono za pomocą najnowszych wersji zaawansowanych programów symulacji procesu wtryskiwania Moldex3D i Cadmould.

Słowa kluczowe: wtryskiwanie tworzyw polimerowych, modelowanie, orientacja włókien

Wtryskiwanie jest obok wytłaczania najważniejszą techniką przetwórstwa tworzyw polimerowych. Polega na cyklicznym uplastycznianiu tworzywa w układzie uplastyczniającym wtryskarki i następnie wtryskiwaniu tego uplastycznionego tworzywa do zamkniętego w czasie formowania narzędzia, zwanego formą wtryskową. Projektowanie wtryskiwania jest prowadzone na podstawie doświadczenia¹⁾, jak i przy zastosowaniu narzędzi CAD/CAE²⁻⁵⁾. Aktualny stan wiedzy w zakresie modelowania procesu wtryskiwania przedstawiono w monografii²⁾. Nowoczesne narzędzia i metody CAD/CAE umożliwiają obecnie rozwiązywanie zagadnień dotąd nierozwiązanych, jak np. zagadnienie nierównomiernego wypełniania form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie³⁾ lub

zagadnienia optymalizacji procesu wtryskiwania przy zastosowaniu technik sztucznej inteligencji, np. sieci neuronowych⁴⁾. Przełomowe znaczenie mają prace zmierzające do zbudowania globalnego modelu procesu wtryskiwania, ujmującego interakcyjne współdziałanie maszyny (wtryskarki) i narzędzia (formy wtryskowej)⁵⁾. Odrębnym i bardzo aktualnym problemem jest zagadnienie przetwórstwa, w tym oczywiście wtryskiwania, zaawansowanych materiałów polimerowych, takich jak kompozyty polimerowe, mieszaniny polimerowe i tworzywa napelniane. W przypadku tych materiałów znane modele zwykle zawodzą, a ponadto brakuje wiarygodnych danych materiałowych, które umożliwiałyby sensowne modelowanie procesu wtryskiwania. Kompozyty polimerowe budowane na podstawie różnego rodzaju osnowy polimerowej i różnego rodzaju wzmocnień stanowią bardzo ważny segment nowoczesnych i dynamicznie rozwijających się materiałów polimerowych. Zagadnienie modelowania orientacji włókien w procesie wtryskiwania tworzyw polimerowych, pomimo już swojej ponad stuletniej historii⁶⁾, jest jednym z najbardziej kluczowych zagadnień w nowoczesnym przetwórstwie tworzyw. Rozwój narzędzi CAE, komputerowego wspomaganie projektowania, jest w głównej mierze przyczyną pobudzenia i podtrzymywania aktywności naukowej w tej dziedzinie już od końca lat 70. XX w.^{7, 8)}. Od niedawna dostępne w programach symulacyjnych rozwiązania pozwalają już nie tylko na wyznaczenie orientacji włókien wynikającej z przepływu two-



Dr inż. Przemysław NAROWSKI (ORCID: 0000-0003-2872-4388) w roku 2013 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Warszawskiej. W 2021 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na tym samym wydziale. Jest adiunktem w Zakładzie Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych PW. Specjalność – inżynieria mechaniczna.

* Adres do korespondencji:

Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, tel.: (22) 234-81-15, e-mail: przemyslaw.narowski@pw.edu.pl

rzywa w formie wtryskowej, ale też na określenie wpływu tej orientacji na warunki przepływu (tzw. modele sprzężone)^{9, 10}. Prowadzone obecnie badania nad bezpośrednią symulacją ruchu włókien z pomocą mechaniki elementów dyskretnych (DEM) zapowiadają jeszcze wyższą jakość przewidywania orientacji włókien w elementach wtryskiwanych¹¹). Jednak stosunkowo niedużo jest doniesień o przydatności coraz dokładniejszej symulacji orientacji włókien w wyrobach wtryskiwanych (wypraskach) w zastosowaniach inżynierskich¹²). Orientacja ta ma fundamentalny wpływ na właściwości mechaniczne wyrobów. Dlatego w pracy podjęto problem oceny przydatności stosowanych obecnie na świecie metod modelowania orientacji włókien w procesie wtryskiwania w praktyce inżynierskiej.

Celem pracy było przeprowadzenie badań symulacyjnych procesu wtryskiwania przy zastosowaniu różnych modeli orientacji włókien i porównanie wyników symulacji wytrzymałości próbek z wynikami badań doświadczalnych. Wyniki badań mają stanowić podstawę optymalizacji procesu kształtowania orientacji włókien w procesie wtryskiwania kompozytów polimerowych.

Stosowany w badaniach kompozyt charakteryzuje się wyjątkowymi właściwościami mechanicznymi oraz termicznymi, co czyni go idealnym materiałem do zastosowań w różnych branżach przemysłowych. Poliamid 6 (PA6) jest popularnym tworzywem technicznym, cenionym za swoje właściwości mechaniczne, takie jak wysoka wytrzymałość na zrywanie i zginanie, dobra udarność oraz stosunkowo wysoka temperatura użytkowania. Dodatek włókna szklanego znacząco poprawia jego właściwości mechaniczne, zwiększając sztywność i odporność na pełzanie. Tarnamid T-27GF50 jest stosowany w różnych gałęziach przemysłu, w tym w motoryzacji, elektrotechnice, budownictwie i meblarstwie¹³).

Część doświadczalna

Materiały

Do badań doświadczalnych i symulacyjnych wykorzystano kompozyt

poliamidu 6 z 50-proc. udziałem masowym drobno ciętego włókna szklanego E-glass (PA6GF50) o nazwie handlowej Tarnamid T-27GF50 produkowanego przez Azoty Tarnów SA.

Metodyka badań

Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZwickRoellZ020 o maksymalnym zakresie obciążenia 20 kN, przestrzeni badawczej o wysokości 1000 mm i prędkości ruchu trawersy do 500 mm/min. Badania symulacyjne wtryskiwania próbek wykonano w programie Moldex3D 2024R2, Cadmould 17.0.1.4, homogenizację właściwości mechanicznych kompozytu w programie Digimat-MS 2023.4, a symulację próby rozciągania w programie Marc Mentat 2024.1. Na rys. 1 i 2 przedstawiono przykłady modelowania w tych środowiskach.

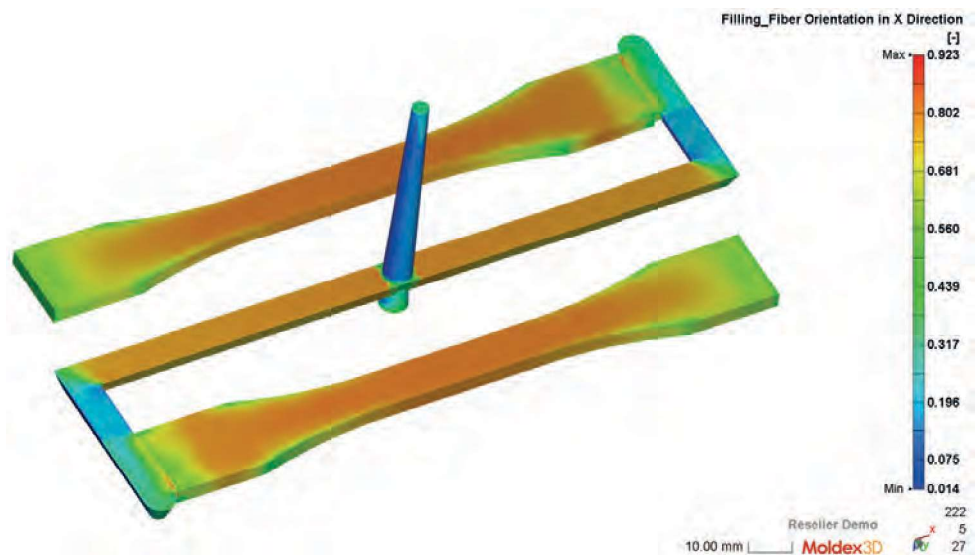


Fig. 1. Example of the result of fiber orientation in the X axis (according to the flow direction) in Moldex3D

Rys. 1. Przykład wyniku orientacji włókien w osi X (zgodnej z kierunkiem przepływu) w programie Moldex3D

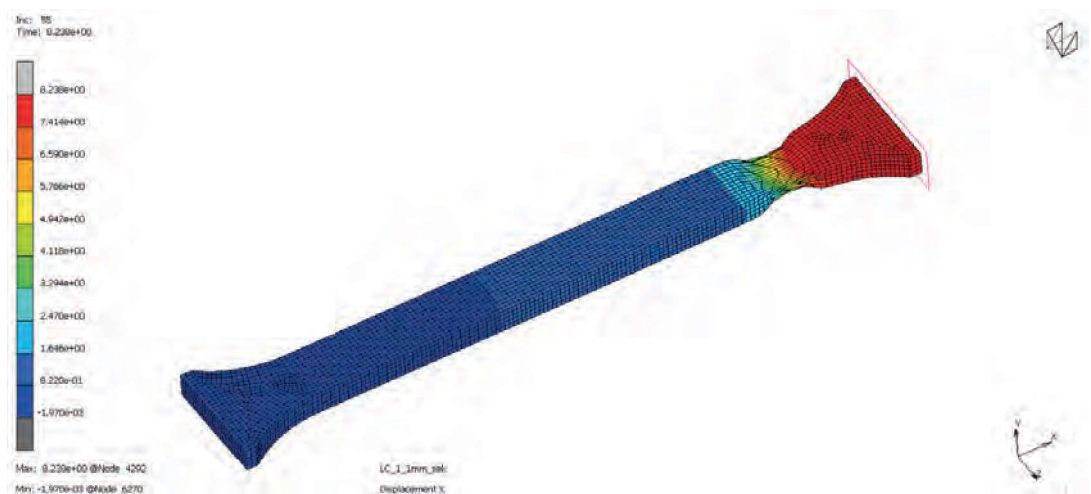


Fig. 2. Example of a tensile test result in the Marc Mentat program

Rys. 2. Przykład wyniku próby rozciągania w programie Marc Mentat

Table 1. Selected parameters for injection simulation

Tabela 1. Wybrane parametry symulacji wtryskiwania

Temperatura wtrysku tworzywa, °C	270
Temperatura formy wtryskowej, °C	80
Czas wtrysku, s	0,6
Czas docisku, s	5
Czas chłodzenia, s	26

Stacyczną próbę rozciągania przeprowadzono zgodnie z normami^{14, 15)} dla 5 próbek wykonanych metodą wtryskiwania. Badania symulacyjne wykonano wg następującej procedury: (i) symulacja wtryskiwania z modelowaniem orientacji włókien dla 4 wariantów modelu numerycznego: model standardowy (Folgara i Tuckera) – powierzchniowa siatka elementów skończonych, model standardowy (Folgara i Tuckera) – przestrzenna siatka elementów skończonych, model rozszerzony (iARD) – przestrzenna siatka elementów skończonych i model sprzężony z polem lepkości (Favaloro i Pipesa) – przestrzenna siatka elementów skończonych; (ii) homogenizacja właściwości mechanicznych kompozytu oraz (iii) symulacja statycznej próby rozciągania.

Parametry symulacji wtryskiwania przedstawiono w tabeli 1. Określenie orientacji włókien szklanych w produkcie, powstałej podczas przepływu tworzywa w formie było kluczowym elementem prowadzonych badań, wymagającym zastosowania zaawansowanych programów do modelowania przepływu tworzyw. Przy modelowaniu przepływu tworzywa w formie podczas wytwarzania próbek do badań wytrzymałościowych przyjęto jako założenia podstawowe, że przepływ jest nieustalony, laminarny, nieizotermiczny, nienewtonowski i jest w pełni rozwinięty (pominięto efekty wlotowe i końcowe). Założono także, że ciecz jest ściśliwa, brak jest poślizgu na ściankach kanałów formy i pominięto siły grawitacji i bezwładności.

Do symulacji wtryskiwania wykorzystano programy Cadmould i Moldex3D. Cadmould dyskretyzuje przestrzeń przepływu za pomocą siatki 2.5D. Program generuje trójkatne elementy skończone, którymi pokrywa powierzchnię wypraski, tworząc w ten sposób tzw. skorupę. Obliczenia przeprowadzane są tylko w obszarze „skorupy”. Wewnątrz modelu nie występują elementy skończone siatki. Przez grubość ściany wypraski przeprowadzone jest do 25 równoległych warstw, w których wartości są wyznaczane z leżących naprzeciwko siebie elementów powierzchniowych w „skorupie”. Oprogramowanie Moldex3D korzysta w pełni z trójwymiarowej siatki elementów skończonych. Obliczenia przepływu są zatem prowadzone również w środku ścian wypraski. Dodatkowo Moldex3D umożliwia wybór metody modelowania orientacji włókien, podczas gdy w Cadmould jedynym dostępnym modelem jest model Folgara i Tuckera. Model Folgara i Tuckera oparty jest na zasadach tensorowej reprezentacji orientacji włókien. Model iARD-RPR

rozszerza model Folgara i Tuckera, uwzględniając efekty dyfuzji rotacyjnej. Model IISO (Favaloro i Pipesa) poprawia przewidywanie orientacji włókien poprzez uwzględnienie dodatkowych parametrów, które uwzględniają efekty anizotropii lepkości.

Wyniki badań i ich omówienie

Wyniki doświadczalnej i numerycznych prób rozciągania przedstawiono na rys. 3 i w tabeli 2. Model standardowy, zarówno przy dyskretyzacji powierzchniowej, jak i bryłowej, wykazał największe rozbieżności względem doświadczenia w kontekście przewidywanej siły i wydłużenia niszczącego. Błąd względny wynosił $\delta_F = 5,5\%$ dla siły i $\delta_E = 15\%$ dla wydłużenia. Najbliższe wartościom zmierzonym w eksperymencie okazały się wyniki dla modelu sprzężonego, najbardziej złożonego ($\delta_F = 4,4\%$ i $\delta_E = 7,7\%$), ale nie były znacząco lepsze od wyników modelowania metodą iARD ($\delta_F = 4,9\%$ i $\delta_E = 7,7\%$).

Na rys. 4 przedstawiono wyniki symulacji orientacji włókien na grubości próbki dla różnych wersji modelu. Model standardowy (Folgara i Tuckera) wyraźnie nie doszacował ilości zorientowanych włókien w warstwach przyściennych. Przewidywał wartości na poziomie 82,6%, podczas gdy wyniki pozostałych modeli były w przedziale 85–85,5%. Model sprzężony (Favaloro i Pipesa) wskazał na większą liczbę włókien zorientowanych w środku grubości (80,9%) niż pozostałe modele (76–79%).

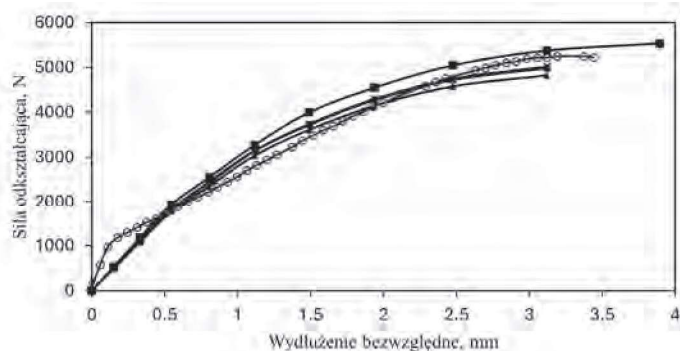


Fig. 3. Tensile test results (● – iARD, ▲ – Folgar-Tucker 3D, ▲ – Folgar-Tucker 2D, × – Favaloro-Pipesa, ■ – experiment)

Rys. 3. Wyniki prób rozciągania (● – model iARD, ▲ – model Folgara i Tuckera 3D, ▲ – model Folgara i Tuckera 2D, × – model Favaloro i Pipesa, ■ – doświadczenie)

Table 2. Static tensile test results

Tabela 2. Wyniki statycznej próby rozciągania

Model	Siła niszcząca, N	Wydłużenie przy zerwaniu, mm
Folgara i Tuckera (siatka 2D)	5536	3,89
Folgara i Tuckera (siatka 3D)	4828	3,12
iARD	4989	3,12
Favaloro i Pipesa	5018	3,12
Doświadczenie	5247	3,38

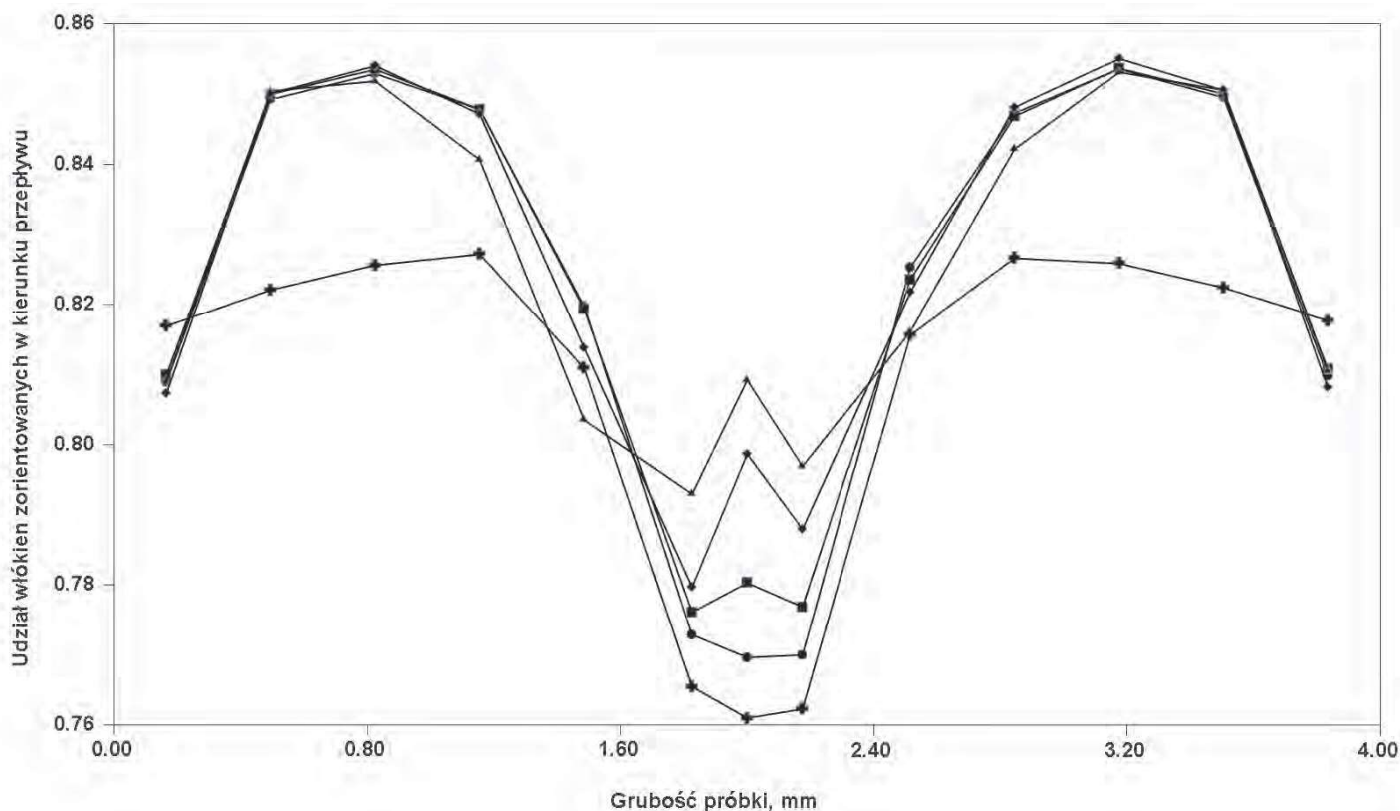


Fig. 4. Fiber orientation along sample thickness results (● – iARD, ▲ – Folgar-Tucker, + – Favaloro-Pipes)

Rys. 4. Wyniki orientacji włókien na grubości próbki (● – model iARD, ▲ – model Fólgara i Tuckera, + – model Favaloro i Pipesa)

Podsumowanie

Dokładność przewidywania właściwości mechanicznych wyprasek wzmocnionych włóknami szklanymi zależy od przyjętej metody modelowania orientacji włókien i od sposobu dyskretyzacji modelu geometrycznego. W pracy wstępnie oceniono przydatność dostępnych modeli orientacji włókien. Dokładna weryfikacja musiałaby nastąpić na większej liczbie rzeczywistych wyrobów, ze względu na nietypowy dla elementów wtryskiwanych kształt próbki.

Otrzymano: 06-10-2024

Zrecenzowano: 18-11-2024

Zaakceptowano: 27-11-2024

Opublikowano: 20-12-2024

LITERATURA

- [1] K. Wilczyński, P. Narowski, *Polym. Eng. Sci.* 2019, **59**, nr 2, 233.
- [2] K. Wilczyński, *Rheology in polymer processing. Modeling and simulation*, Hanser, Monachium 2020.
- [3] K. Wilczyński, P. Narowski, *Polymers* 2019, **11**, nr 4, 639.
- [4] K. Wilczyński, P. Narowski, *Polymers* 2020, **12**, nr 4, 805.
- [5] P. Narowski, K. Wilczyński, *Polymers* 2024, **16**, nr 1, 147.
- [6] G.B. Jeffery, *Proc. Roy. Soc.* 1922, **A102**, 161.
- [7] C.L. Tucker, *Computer modeling for polymer processing*, Hanser, Monachium 1989.
- [8] C.L. Tucker, *Fundamentals of fiber orientation*, Hanser, Monachium 2022.
- [9] A.J. Favaloro, H.C. Tseng, R.B. Pipes, *Compos. Part.* 2018, **115**, 112.
- [10] H.C. Tseng, A.J. Favaloro, *J. Rheol.* 2019, **63**, 263.
- [11] S.K. Kugler, G.M. Lambert, C. Cruz, A. Kech, T.A. Osswald, D.G. Baird, *AIP Conf. Proc.* 2020, **2205**, 020050.
- [12] Y. Shi, W.J. He, H. Ji, V. Deshpande, *EMAS* 2024, **1**, 1.
- [13] <https://grupaaoty.com>, dostęp 6 października 2024 r.
- [14] EN ISO 527-1, *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości rozciągających. Cz. 1. Zasady ogólne.*
- [15] EN ISO 527-2, *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości rozciągających. Cz. 2. Warunki badania tworzyw sztucznych do formowania i wytłaczania.*