

Dariusz SYKUTERA, Karol PEPLIŃSKI

e-mail: sykutera@utp.edu.pl

Instytut Technik Wytwarzania, Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

Zastosowanie programu *Ansys-Polyflow* do wspomagania wytwarzania opakowań formowanych próżniowo

Wstęp

Formowanie próżniowe jest metodą obróbki tworzyw polimerowych, w której materiał wejściowy ma postać arkusza lub płyty, wcześniej wytworzonych metodą wytłaczania. Ten sposób kształtowania wytworów polega na równomiernym lub zróżnicowanym nagraniu obrabianego materiału powyżej temperatury mięknięcia T_m (tworzywa bezpostaciowe) lub temperatury topnienia krystalitów T_i (tworzywa częściowo krystaliczne), a następnie dwuosiowym rozciąganiu pod wpływem ciśnienia zewnętrznego, aż do momentu odwzorowania kształtu gniazda lub stempla formy [1–4].

Z całkowitej masy 230 mln ton przetworzonych w 2009 roku tworzyw polimerowych, produkcja opakowań stanowiła 38% [5]. Branża ta to głównie folie jedno- i wielowarstwowe, folie barierowe oraz cienkościennie opakowania, także butelki, z PEHD, PEHD, PP i PET. Z uwagi na skalę, produkcja opakowań odbywa się przede wszystkim poprzez: wytłaczanie, wytłaczanie z rozdmuchiwaniem, wtryskiwanie i rozciąganie próżniowe. Zwłaszcza w obszarze produkcji cienkościennych butelek i cienkościennych opakowań spożywczych wykorzystuje się zarówno znane od lat technologie wytłaczania z rozdmuchiwaniem i rozciąganie próżniowe, jak i wtryskiwanie. W przypadku produkcji opakowań z PP do lodów o pojemności 1 i 2 litrów, dominuje wtryskiwanie (technologia IML). W obszarze małogabarytowych opakowań spotyka się zarówno wytwory uzyskane za pomocą rozciągania próżniowego (np. kubeczki do jogurtów, wody mineralnej oraz kawy), jak i te same opakowania wykonane w technologii wtryskiwania. Formowanie cienkościennych wyprasek pod dużym ciśnieniem w formach wtryskowych wymaga znacznie większych nakładów inwestycyjnych, ale odbywa się w pełni automatycznie z większą wydajnością i bezodpadowo.

Można zatem uznać, że potencjalnym obszarem zastosowań technologii rozciągania próżniowego jest produkcja mało- i wielkoseryjna oraz te obszary produkcji masowej, w której planuje się produkcję z mniejszą wydajnością przy niższych kosztach inwestycyjnych. Są to głównie opakowania jednorazowego użytku, które po spełnieniu swego cyklu życiowego są zazwyczaj poddawane recyklingowi. Technologia rozciągania próżniowego jest wykorzystywana także do formowania płyt grubościennych, w tym także porowatych [6].

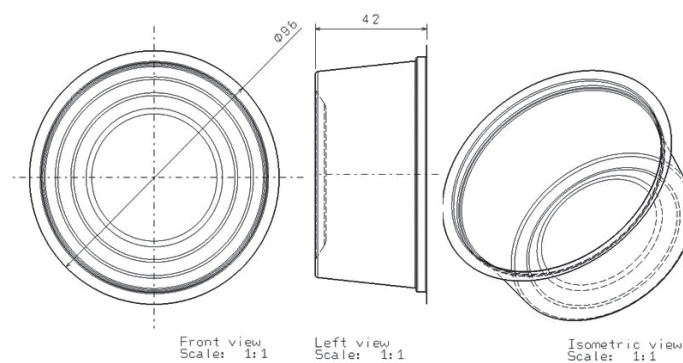
Celem pracy jest próba eliminacji w postaci wad formowania próżniowego nierównomiernego rozkład grubości ścianki powstającego wytworu.

Niedogodność ta może zostać zminimalizowana poprzez zastosowanie inżynierskich narzędzi do komputerowego wspomaganie wytwarzania, takich jak oprogramowanie *Ansys-Polyflow* [7]. W światowej literaturze naukowej można dostrzec obszary, w których wykorzystanie metod numerycznych spowodowało uzyskanie wytworów o podwyższonej jakości, jednak w tych pracach stosowano inny *software* [2, 8–12]. Jednym ze sposobów uzyskiwania tego typu wytworów jest wytworzenie na powierzchni arkusza zmiennego pola temperaturowego, dzięki któremu różnicuje się w całej objętości odkształcenie materiału, co umożliwia uzyskanie korzystniejszego rozkładu grubości ścianki. Obecnie oferowane urządzenia do rozciągania próżniowego umożliwiają niejednorodne nagrzewanie arkusza folii. Z tych powodów uzasadnione było podjęcie próby numerycznego zamodelowania procesu formowania próżniowego w programie *Ansys-Polyflow*. Program ten wykorzystuje w swoim algorytmie równania pędu, masy i energii w odniesieniu do właściwości tworzyw polimerowych. Wcześniejsze prace modelowania w programie *Polyflow* dotyczyły wytwarzania butelek z PEHD metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniem [13, 14]. Należy nadmienić, iż w polskojęzycznej literaturze naukowej, jak dotąd nie podjęto prób

modelowania zjawisk zachodzących podczas formowania próżniowego cienkościennych opakowań z poliolefin w programie *Polyflow*.

Metodyka badań własnych

Do badań numerycznych wytypowano opakowanie do serków spożywczych, którego model przedstawiono na rys. 1, a dane charakterystyczne tworzywa, z którego jest wykonane, zawarto w tab. 1. Na podstawie przyjętego modelu geometrycznego wytworu, wykonano model geometryczny arkusza i gniazda formy, które następnie poddano procesowi dyskretyzacji MES w module *Ansys Meshing*.



Rys. 1. Model 3D opakowania cienkościennego

Tab. 1. Dane charakterystyczne PP i założenia wykorzystane podczas symulacji

Dane materiałowe	
Gęstość	900 kg·m ⁻³
Temperatura mięknięcia	423 K
Przewodność cieplna	50000 g·cm·(K·s ⁻³) ⁻¹
Pojemność cieplna	3·10 ⁷ cm ² ·(K·s ⁻³) ⁻¹
Lepkość	60000 g·(cm·s) ⁻¹
Założenia wstępne modelu i procesu	
Grubość wejściowa arkusza folii	1 mm
Ciśnienie rozdmuchiwania arkusza	0,5 MPa
Temperatura formy	360 K
Założona, stała temperatura folii	423 K

W module *Polydata* wyodrębniono dwa podobszary: arkusz (podobszar 1), ograniczony czterema granicami oraz formę negatywową (podobszar 2). Zgodnie z zaleceniami producenta oprogramowania zdefiniowano następujące warunki brzegowe [8]: powierzchnię swobodną – określaną jako obszar modelu powłokowego dla arkusza, z atrybutem grubości; powierzchnię kontaktu pomiędzy arkuszem tworzywa a formą negatywową; granicę symetrii wytworów – warunek ustala się na podstawie analizy przepływu względem tej granicy.

Kolejnym etapem było uwzględnienie zjawisk nieizotermicznych podczas etapu formowania próżniowego, co wiązało się ze zdefiniowaniem warunków początkowych i brzegowych dla poszczególnych objętości arkusza i formy (symetria wytworów).

W dalszej części modelowania określono właściwości tworzywa oraz zdefiniowano wartość ciśnienia podczas formowania próżniowego (Tab. 1).

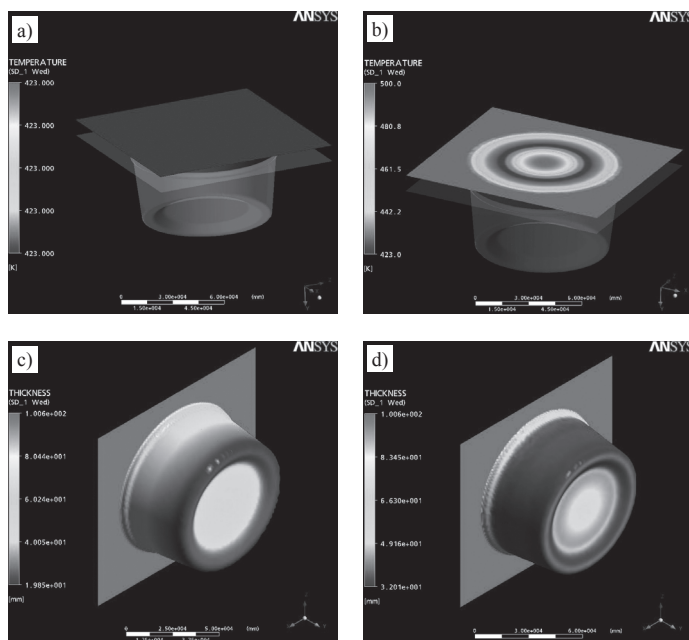
Zdefiniowano także czynniki wyjściowe symulacji jako: rozkład grubości ścianki formowanego arkusza oraz rozkład temperatury podczas

ogrzewania arkusza. Pozwoliło to na skorelowanie zależności pomiędzy minimalną grubością ścianki a temperaturą grzania. W module *Polyflow* przeprowadzono obliczenia, których rezultatem było wygenerowanie plików tekstowych i graficznych niezbędnych do wizualizacji wyników badań. Pozwalał na to moduł do przetwarzania końcowego *Ansys CFD-Post*.

Modelowanie procesu odbywało się w kilku etapach, w których informacja o rozkładzie grubości ścianki wypraski była wejściową do realizacji kolejnej modyfikacji pola temperaturowego podczas nagrzewania arkusza z polipropylenu. Wykonano 4 modele procesowe, w których kryterium oceny był rozkład grubości ścianki wytworu. Założono, że grubość ścianki wytworu powinna być jak najbardziej jednorodna, a jej wartość nie może być mniejsza niż 0,3 mm.

Wyniki badań

Przyjęcie założenia o jednakowym nagrzaniu arkusza z PP spowodowało największe pocienienie opakowania cienkościennego, a najbardziej narażonym na utratę ciągłości materiału były naroża opakowania (Rys. 2a, c). Zrealizowane kolejne trzy symulacje, ze zmodyfikowanym i zróżnicowanym polem temperatury podczas nagrzewania arkusza, znacząco zmniejszyły różnice w grubości ścianki. Najlepsze wyniki uzyskano dla wariantu przedstawionego na rys. 2b, dla którego udało się zmniejszyć rozrzut grubości ścianki wytworu z 0,51 mm do 0,18 mm (Rys. 2d).



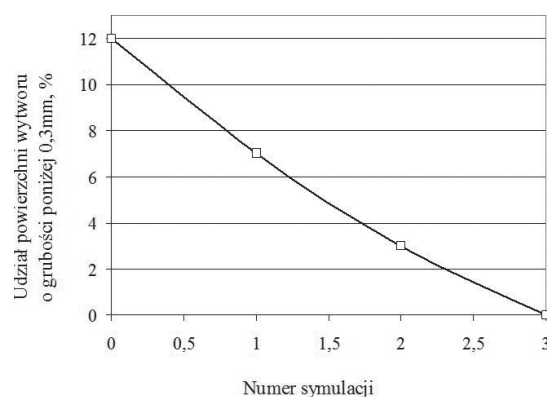
Rys. 2. Pole temperatury zamodelowane w programie *Polyflow* oraz wynikowe rozkłady grubości wytworu: c) przy stałej temperaturze nagrzewania arkusza (a), d) przy zmiennym, najbardziej oczekiwanym rozkładzie temperatury grzania arkusza z PP (b)

Na podstawie analizy uzyskanych wyników numerycznych stwierdzono, że w przypadku stałego pola temperatury nagrzewania, aż 12% całkowitego pola powierzchni wypraski charakteryzuje się grubością poniżej 0,3 mm, natomiast doprowadzenie zmiennego strumienia ciepła do arkusza wejściowego, niweluje ilość obszarów o słabych właściwościach mechanicznych i użytkowych praktycznie do zera (Rys. 3). To właśnie grubość w obszarach newralgicznych wytworu decyduje bowiem o całkowitej wytrzymałości opakowania. Nadmierne pocienienie ścianek może prowadzić także do zmiany koloru, co obniża finalną jakość wytworu.

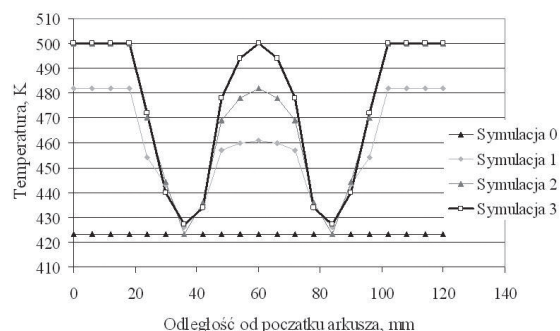
Podsumowanie

Oprogramowanie *Ansys-Polyflow*, umożliwia przeprowadzenie eksperymentu numerycznego w zakresie modelowania zjawisk zachodzących podczas procesu formowania próżniowego.

Poprzez sterowanie określonymi segmentami układu grzałek można uzyskiwać korzystniejszy rozrzut grubości formowanych elementów, co



Rys. 3. Udział powierzchni wytworu poniżej założonej grubości 0,3 mm w zależności od przyjętego modelu nagrzewania arkusza materiału



Rys. 4. Zmiany temperatury sugerowane przez program symulacyjny – symulacja nr 3 najkorzystniejszy rozkład grubości, symulacja nr 0 – stałe pole temperatury grzania

zwłaszcza w przypadku skomplikowanej geometrii stwarza nowe możliwości stosowania technologii formowania próżniowego. Skorelowanie wyników symulacyjnych z próbami rzeczywistymi może spowodować zwiększenie asortymentu wytworów i obniżyć koszty ich produkcji np. poprzez zmniejszenie ilości powstających odpadów technologicznych.

Zastosowanie programu *Ansys-Polyflow* może wspomagać realizację optymalizacji procesu formowania próżniowego w zakresie rozkładu grubości ścianki wytworów.

LITERATURA

- [1] G. Gruenwald: *Thermoforming: A Plastic Processing Guide*, 2nd Ed., Technomic Publ. Co., pp. 209-223, Lancaster, PA 1998.
- [2] J. Throne: *Technology of thermoforming*. Hanser Publishers, Munich (1996).
- [3] B. Moore: In-cycle control of the thermoforming reheat process. Department of Electrical and Computer Engineering, McGill University Montreal 2002.
- [4] H. Seachtling: *Tworzywa sztuczne – poradnik*. WNT, Warszawa 2000.
- [5] *The Compelling Facts About Plastics 2009*. Plastic Europe Market Research Group (PEMRG), Plastics Europe, Belgia 2010.
- [6] L. Piecyk: *Laboratorium – Przegląd Ogólnopolski nr 7*, (2006).
- [7] Materiały informacyjne firmy *Ansys-Polyflow* (2010): <http://www.ansys.com/products/fluid-dynamics/polyflow>
- [8] M. K. Warby: *Mathematics and Computers in Simulation*, **61**, 209, (2003).
- [9] H. G. DeLorenzi: *Journal of Pressure Vessel Technology*, **113**, 102, (1991).
- [10] D. Szegda: Computational modeling of a thermoforming process for thermoplastic starch, *Materials Processing and Design: M.S&A., NUMIFORM '07*, Vol. 908, pp. 35-48, AIP Conf. Proc. 2007.
- [11] C. P. J. O'Connor: *International Journal of Material Forming*, **1**, Suppl. 1, 779 (2008)
- [12] W. G. Jiang: *Computat. Mech.*, **31**, 163 (2003).
- [13] K. Pepliński, A. Mozer: *Journal of Polish CIMAC, Selected Problems of Designing and Operating Technical Systems*, **5**, nr 3, 143 (2010)
- [14] K. Pepliński: Prediction of parison geometry for the container with handle in *Ansys-Polyflow*, *Developments in Machinery Design and Control*. UTP Bydgoszcz, (2010) – w druku.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy 4422/B/T02/2009/36.