

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИДУВУ ПЕТ-ТАРИ ІЗ ПРЕФОРМ

Проведено числове моделювання процесу видувного формування ПЕТ-тари з преформ. Показано результати моделювання, що дозволили виявити залежність часу видуву та потрібного тиску від швидкості штока. Виявлено, що формування за рівномірної температури преформи не дає змоги отримати рівнотовщинну тару, для досягнення більш рівномірної мінімально достатньої товщини стінки тари необхідно прогрівати преформу диференційовано по висоті залежно від ступеню роздуву в даній області.

Ключові слова: моделювання, видув, ПЕТ, тара.

© Сокольський О. Л., Дагдій В. М., 2018

Постановка проблеми. В процесі видувного формування полімерної тари із преформ спочатку полімерна заготовка (преформа) формується шляхом лиття під тиском, після чого преформу знов розігрівають та вводять в іншу форму, де кінцевий виріб роздувається під дією стисненого повітря. Часто пневматичному видуву передуює механічне осьове витягування преформи штоком [1].

Процес автоматизованого видування порожнистих виробів швидко розвивався протягом останнього століття, в той же час збільшився спектр застосувань та різноманітності матеріалів.

Впродовж останніх десятиліть комп'ютерні моделі істотно сприяли покращенню та розумінню процесів формування тари, і в даний час вони широко використовуються для оптимізації процесу. Комп'ютерні моделі можуть допомогти звести до мінімуму небажані варіації товщини стінки і зменшити вагу при збереженні міцності. Незважаючи на те, що формування видувом використовували протягом багатьох років, виробники все ще стикаються з труднощами в оптимізації та контролі процесу [2].

Аналіз попередніх досліджень. У роботі [3] комп'ютерна імітаційна модель, представлена в роботах [4, 5], застосовується до розтягувального процесу для виробництва ПЕТ-пляшок. Модель раніше була розроблена авторами для імітації 2D осьосиметричного процесу виробництва скляних контейнерів. Модель побудована на методах скінченних елементів і використовує метод встановлення рівня для відстеження інтерфейсів між повітрям і матеріалом. Вона була успішно випробувана для реалістичних застосувань у скляній промисловості, а також була використана для оптимізації товщини контейнера [6].

Щодо реологічного стану полімерів під час видуву, в літературі було введено три різні моделі для опису механіки розплаву полімеру, що підлягає видуву, а саме: гіпереластичні, в'язко-еластичні та в'язкопластичні моделі. Зважаючи на короткий час видуву (0,5 с), то можна припустити комбінацію високоеластичних та в'язких моделей [7]. Проте, високоеластичні моделі мають труднощі з визначенням характеристик матеріалу та прогнозом часу, що залежить від поведінки полімеру під час процесу видуву.

Метою досліджень є проведення числових досліджень процесу формування ПЕТ-тари під дією таких вхідних факторів, як розподіл температур, тиск в формі, час роздуву заготовки для досягнення найбільш рівномірної та мінімальної товщини стінки сформованої тари та визначення технологічних режимів, необхідні для цього.

Виклад основного матеріалу. Математична модель, яка описує механіку процесу видування ПЕТ-тари, за роботою [3] включає такі рівняння:

- збереження кількості руху

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g}$$

- збереження маси для нестисливої рідини

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

- енергії

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + \boldsymbol{\sigma} : \nabla \mathbf{u}$$

де t – час, с; ρ – густина, кг/м³; \mathbf{u} – вектор швидкості, м/с; ∇ – оператор Гамільтона; $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напруження другого рангу, Па; \mathbf{g} – вектор прискорення вільного падіння, м/с²; c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); $\mathbf{q} = -\lambda_m \nabla T$ – вектор густини теплового потоку, Вт/м²; T – абсолютна температура, К; λ_m – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку.

У цій роботі для опису реологічної поведінки полімеру використовується в'язка модель, представлена в [8, 9].

Рівняння стану для тензора напруження $\boldsymbol{\sigma}$ описується формулою:

$$\boldsymbol{\sigma} = 2\eta(\dot{\gamma})\dot{\boldsymbol{\epsilon}} - p\mathbf{I}$$

де η – в'язкість, Па·с; p – зовнішній тиск, Па; \mathbf{I} – одиничний тензор другого рангу; тензор швидкості деформації залежить від швидкості потоку як

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$$

Залежність в'язкості від швидкості зсуву виражена степеневим законом з урахуванням впливу зміни температур

$$\eta(\dot{\gamma}) = K(\lambda\dot{\gamma})^{n-1}H(T)$$

де K – коефіцієнт консистенції, Па·с; λ – період релаксації, с; n – індекс течії; $\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \cdot \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}$ – другий інваріант від $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$, с⁻¹.

$$H(T) = \exp\left[\frac{E_a}{RT_a}\left(\frac{1}{T-T_0} - \frac{1}{T_a-T_0}\right)\right]$$

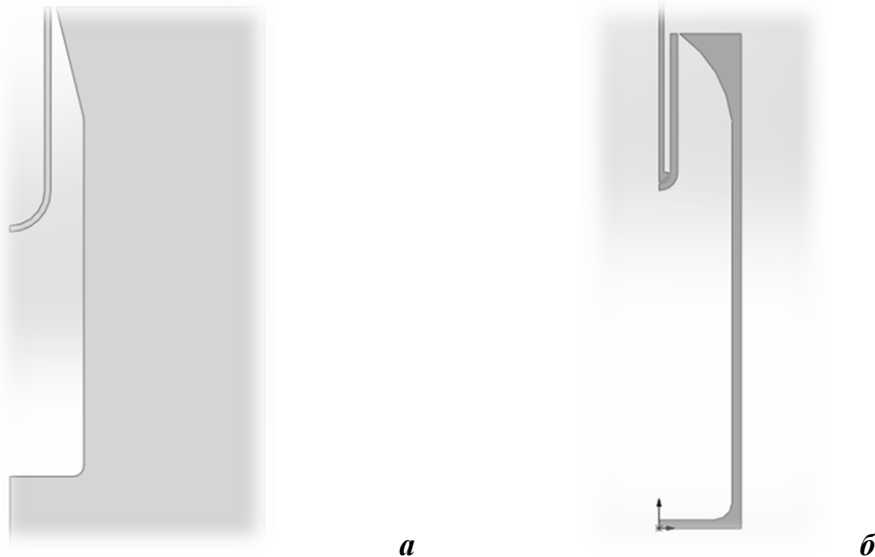
де E_a – енергія активації течії, Дж/моль; R – газова стала, Дж/(моль·К); T – діюча температура, К; T_0 – абсолютна температура відліку, К; T_a – абсолютна температура активації, К.

Для замикання постановки задачі необхідно додати початкові та граничні умови:

- на поверхні заготовки нормальне напруження повинно бути рівне зовнішньому тиску;
- на поверхнях форми та розтягувального штока – умова прилипання ($\mathbf{u} = 0$);

Початкові умови включають розподіл компонент швидкості та тиску ($\mathbf{u} = 0$; $p = p_0$) в початковий момент часу в розрахунковій області.

Для моделювання процесу видуву в системі ANSYS Polyflow було взято два варіанти геометрії: без штока (рис. 1а) та зі штоком (рис. 1б). Задача розглядалась як осьосиметрична.



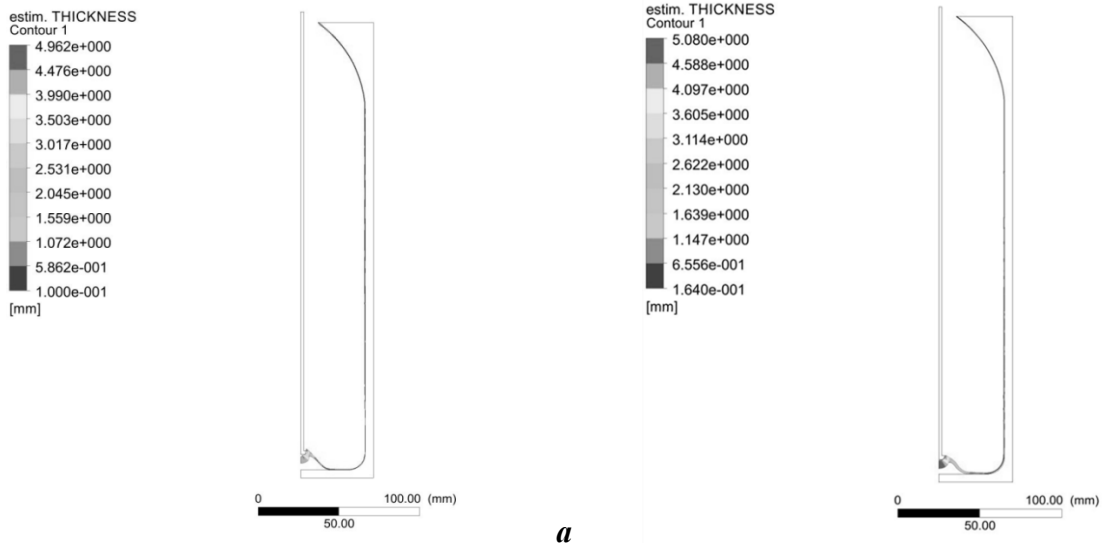
а – без штока; б – зі штоком

Рис. 1 – Геометрія розрахункової області

Внутрішня поверхня преформи задавалась як вільна поверхня з діючим а неї тиском. Зовнішня поверхня преформи – як вільна поверхня до контакту з роздувною формою. Розв'язувалась задача визначення розташування заготовки на протязі часу видуву за умови збереження її об'єму. Форма та шток вважались не деформованими.

У результаті моделювання видуву без штоку було виявлено, що пляшка розривається, коли товщина її стінки досягає критичного значення. При моделюванні видуву зі штоком пляшка видувається повністю. Моделювання видуву зі штоком було проведене за ізотермічних (рис. 2а) та неізотермічних (рис. 2б) умов, коли температура збільшується лінійно від низу (100 °С) до горлечка (120 °С), а температурна залежність в'язкості ПЕТ підпорядковується закону Арреніуса.

З графічних залежностей на рис. 2 видно, що за результатами моделювання пляшка видувається повністю, проте за неізотермічних умов товщина стінки рівномірніша. Повний видув, тобто щільне прилягання заготовки до форми, вдавалось отримувати лише за певної комбінації технологічних умов.



а – за ізотермічних умов; *б* – за умови лінійної зміни температури по висоті

Рис. 2 – Результати видувного формування ПЕТ-тари

Розрахунки виявились вдалимими зокрема за таких умов:

1 - Швидкість пуансона - 0,4 м/с, час роздуву - 0,48 с, тиск - 0,8 МПа.

2 - Швидкість пуансона - 0,6 м/с, час роздуву - 0,38 с, тиск - 1,5 МПа.

3 - Швидкість пуансона - 0,8 м/с, час роздуву - 0,31 с, тиск - 1,9 МПа.

4 - Швидкість пуансона - 0,8 м/с, час роздуву - 0,31 с, тиск - 1,9 МПа, температура збільшується від низу до горлечка.

Результат розрахункового розподілу товщини стінки пляшки представлений на рис. 3.

Для досягнення рівномірнішого розподілу товщин стінки тари було виконано ітераційну процедуру визначення необхідного для цього перерозподілу температури преформи.

Преформа розбивалась на низку умовних вузлів по висоті. Для кожного вузла преформи, її нова початкова температура отримувалась із залежності

$$T_i = T_{i-1} + a(T^* - T_i)$$

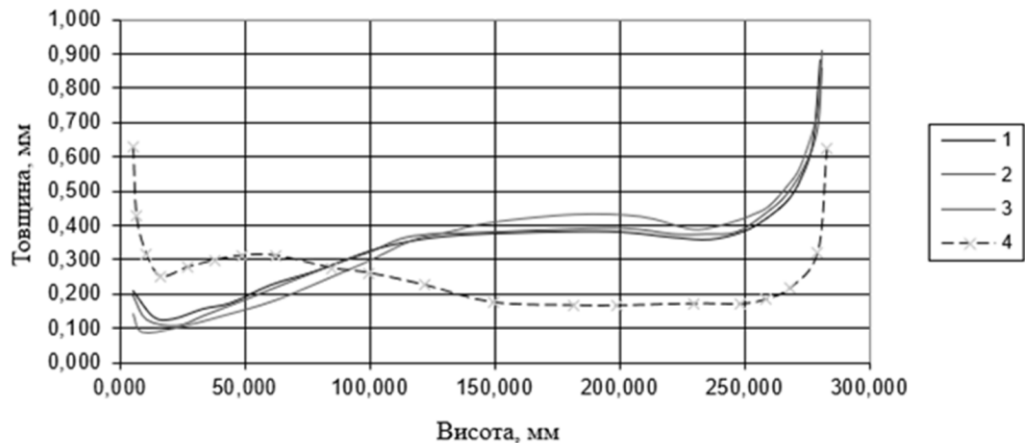
де a – коефіцієнт нижньої релаксації, T_{i-1} – попередня температура, °С, T^* – температурний розв'язок наступного рівняння:

$$T^* = T_i \frac{hf}{hd}$$

де hf – товщина поточного вузла в кінці моделювання, hd – потрібна товщина.

В результаті проведених розрахунків за неізотермічних умов з врахуванням нового розподілу температур (рис. 4) отримано більш рівномірний розподіл товщини стінки по висоті пляшки (рис. 5).

Таким чином, проведені дослідження показали, що преформу потрібно розігрівати не рівномірно, а з урахуванням ступеню розтягування в кожній ділянці. Наведена методика розрахунку температур розігріву дозволяє отримувати мінімальний доцільний профіль товщин ПЕТ-тари різної форми з умов забезпечення міцності, жорсткості й непроникності.



1-3 – за ізотермічних умов; *4* – за умови лінійної зміни температури по висоті

Рис. 3 – Розподіл товщини стінки по висоті пляшки

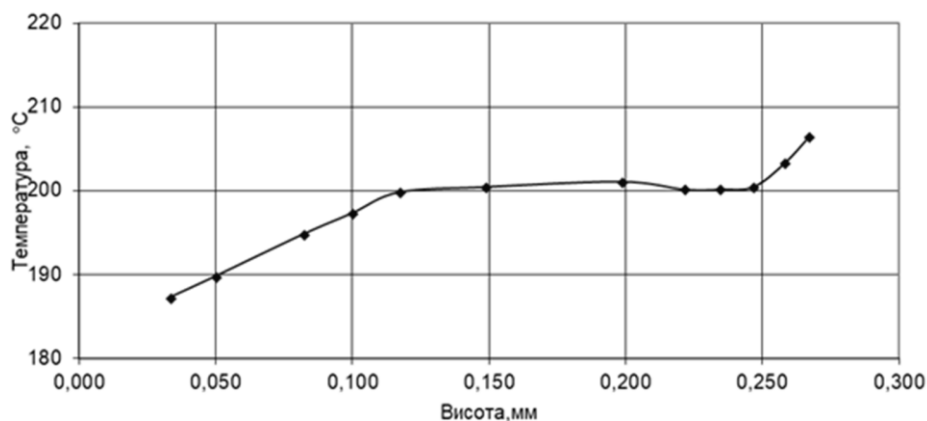
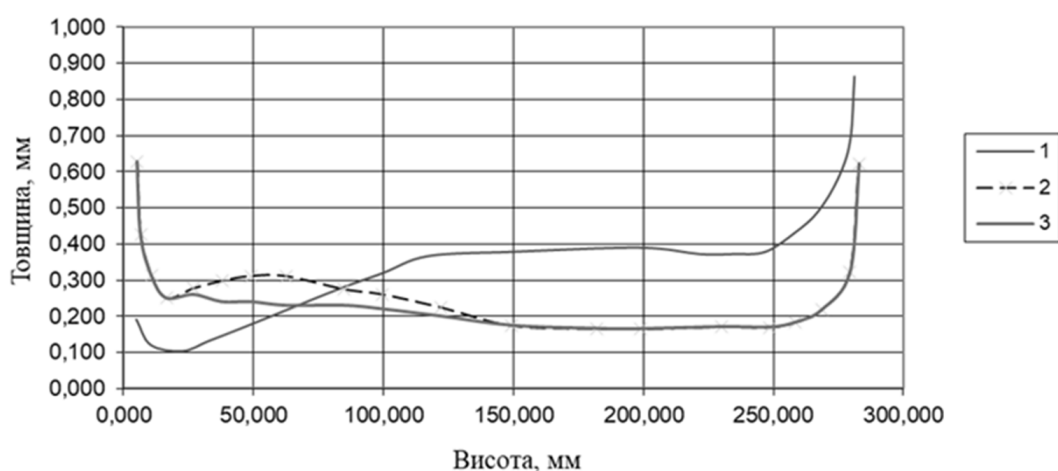


Рис. 4 – Розподіл температур по висоті пляшки



1 – за ізотермічних умов, 2 – за умови лінійного розподілу температур, 3 – в результаті розрахункового розподілу температур

Рис. 5 – Розподіл товщини стінки по висоті пляшки

Висновок. Проведені числові дослідження процесу видуву ПЕТ-тари дозволили встановити доцільність застосування розтягувального штоку. Моделювання процесу видуву зі штоком дало змогу виявити взаємозв'язок між швидкістю штоку, часом та тиском видуву. Проведені числові дослідження показали ефективність методики розрахунку температур розігріву преформи по зонах для отримання тари з заданим профілем товщини стінки.

Перспектива подальших досліджень. Задача подальших досліджень передбачає проведення натурних експериментів для оцінки точності й достовірності числового моделювання.

Список використаної літератури

1. *Справочник упаковщика* [Электронный ресурс] // Способы упаковки. ПЭТ бутылки: история, свойства, технология производства. URL: <https://ref.unipack.ru/119/>
2. *Производство изделий из полимерных материалов: Учеб. пособие* / Крыжановский В.К. и др. Санкт-Петербург : Профессия, 2004. 464 с.
3. Groot J. A., Giannopapa C. G., Mattheij R. M. A computer simulation model for the stretch blow moulding process of polymer containers. In Proceedings of PVP 2010 : ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 18-22, 2010, Bellevue, Washington, USA.
4. Giannopapa C. G. Development of a computer simulation model for blowing glass containers. // J. Man. Sci. Eng. 2008. p. 130.
5. Giannopapa C. G., Groot J. A. A computer simulation model for the blow-blow forming process of glass containers. ASME Pressure Vessels and Piping Conf. and 8th Int. Conf. on CREEP and Fatigue at Elevated Temp. July 22-26, 2007.
6. Groot J. A., Giannopapa C. G., Mattheij R. M. Numerical optimisation of blowing glass parison shapes. In Proceedings of PVP 2009: ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. July 26-30, 2009.
7. De Lorenz, H. G., Nied H. F. Blow molding and thermoforming of plastics: Finite element modelling // Comput. Struct. 1987. 26. pp. 197–206.

8. Wang S., Makinouchi A., Nakagawa T. Three-dimensional viscoplastic fem simulation of a stretch blow molding process. Adv. Polym. Techn. 1998. № 17 (3).
9. Карвацький А. Я. Механіка суцільних середовищ [Електронний ресурс]: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. 290 с.
Надійшла до редакції 01.06.2018