

СІДОРОВ Д. Е., к.т.н., доц.; КОЛОСОВ О. Є., д.т.н., проф.; ГУР'ЄВА А. О.
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕТ-ВИРОБІВ У ПРОЦЕСІ ФОРМУВАННЯ

Запропоновано методику оперативного оцінювання геометричних параметрів ПЕТ-виробу у процесі його формування з ПЕТ-преформи. Виконано аналіз процесу виготовлення ПЕТ-пляшок ємністю 1л і 0,5 л. Складені залежності для визначення ступеня витягування та товщини стінки на всіх фазах і етапах виготовлення ПЕТ-пляшки.

Ключові слова: преформа, ПЕТ-вироби, ступінь витягування, формування

© Сідоров Д. Е., Колосов О. Є., Гур'єва А. О., 2017.

Постановка проблеми. У звичайній високошвидкісній ротаційній машині для виробництва пляшок з поліетилентерефталату (ПЕТ) розігріті в камері нагріву ПЕТ-преформи протягом певного часу залишаються для вирівнювання температури, а потім подаються у відкриті форми для формування пляшок. Як тільки форма закривається, ПЕТ-преформа механічно витягується за допомогою дорна. Далі виконується технологічна фаза видування, що проходить при високому внутрішньому тиску, в ході якої пляшка набуває остаточного вигляду. Дорн виймається, пляшка охолоджується, після чого форма відкривається і готову пляшку вивантажують на транспортер або у бункер-накопичувач. Таким чином, інтерес представляє оперативна оцінка параметрів ПЕТ-виробу на всіх етапах процесу його формування з ПЕТ-преформи.

Аналіз останніх досліджень. Технологічна фаза нагрівання з використанням інфрачервоних нагрівачів описана у роботі [1]. Використання методу роздуву для отримання полімерної гофри з поліолефінів та основи моделювання процесу роздуву викладено у роботах [2, 3]. В цих роботах застосовано методи численного інтегрування диференціальних рівнянь, які вимагають виконання ресурсоемних комп'ютеризованих розрахунків. Крім того, фази та етапи формування ПЕТ-виробів суттєво відрізняються від етапів екструзійного формування гофрованих трубних виробів з поліолефінів.

Метою даної роботи є розробка методики оперативного оцінювання геометричних параметрів ПЕТ-виробу при його формуванні з ПЕТ-преформи.

Виклад основного матеріалу. Користуючись підходом, який запропонований у роботі [3], складемо рівняння, що відображають збереження об'ємів матеріалу ПЕТ-преформи і ПЕТ-виробу на всіх етапах процесу формування.

ПЕТ-преформа має форму пологого циліндру із сферичним донцем. Розігріта ПЕТ-преформа на першій фазі формування витягується дорном. При цьому, товщина стінки зменшується пропорційно подовженню заготовки. Об'єм ПЕТ-преформи до початку процесу витягування визначається наступним чином:

$$V_0 = R_0 l_0 \delta_0 + 2\pi R_0^2 \delta_0, \quad (1)$$

де R_0 – середній радіус стінки ПЕТ-преформи до деформування; l_0 – початкова довжина циліндричної частини ПЕТ-преформи; δ_0 – початкова товщина стінки ПЕТ-преформи.

Об'єм ПЕТ-заготовки після першої фази формування – витягування дорном становить:

$$V_1 = R_0 l_1 \delta_1 + 2\pi R_0^2 \delta_1, \quad (2)$$

де $l_1 = l_0 + \Delta l_1$; Δl_1 – подовження ПЕТ-заготовки після першої фази формування, яка відповідає переміщенню дорна; δ_1 – товщина стінки ПЕТ-заготовки після першої фази формування.

Виходячи з рівнянь (1) і (2), товщина ПЕТ-заготовки після першої фази формування буде визначатися наступним рівнянням:

$$\delta_1 = \delta_0 \frac{l_0 + 2\pi R_0}{l_1 + 2\pi R_0}. \quad (3)$$

Ступінь витягування після першої фази формування:

$$\lambda_1 = \frac{\delta_0}{\delta_1}, \quad (4)$$

може бути записана через вихідні параметри наступним чином:

$$\lambda_1 = 1 + \frac{\Delta l_1}{l_0 + 2\pi R_0}. \quad (5)$$

Друга фаза – фаза роздуву ПЕТ-заготовки. На цій фазі деформування ПЕТ-заготовки відбувається одночасно у всіх напрямках. Але, умовно його можливо поділити на два етапи: подовжне – осьове деформування і поперечне – радіальне деформування.

Крім того, оскільки форма ПЕТ-виробу може бути складною, то цей процес слід розглядати для кожної характерної ділянки формоутворення кінцевого ПЕТ-виробу.

Зміна довжини ПЕТ-заготівки на другій фазі формування відповідає за фізичною сутністю зміні довжини на першій фазі формування. Таким чином, рівняння (3) – (5) для цього випадку можуть бути записані у наступному вигляді:

$$\delta_2 = \delta_1 \frac{l_1 + 2\pi R_0}{l_2 + 2\pi R_0}, \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \frac{\delta_1}{\delta_2}, \quad (7)$$

$$\lambda_2 = 1 + \frac{\Delta l_2}{l_0 + \Delta l_1 + 2\pi R_0}, \quad (8)$$

де $l_2 = l_1 + \Delta l_2$; Δl_2 – подовження ділянки ПЕТ-заготівки після другої фази формування; δ_2 – товщина стінки ділянки ПЕТ-заготівки після першого етапу другої фази формування.

Для другого етапу другої фази формування ПЕТ-заготівки врахуємо радіальну складову деформування. Рівняння (2) для цього випадку прийме наступний вигляд:

$$V_3 = R l_2 \delta_3 + 2\pi R^2 \delta_3 \quad (9)$$

де $R = R_0 + \Delta R$; ΔR – зміна радіусу ділянки ПЕТ-заготівки після другої фази формування; δ_3 – товщина стінки ділянки ПЕТ-заготівки після другої фази формування, яка відповідає товщині кінцевого ПЕТ-виробу.

Рівняння, аналогічні (6), (7), (8), для ступеню витягування λ_3 та товщини стінки δ_3 ділянки ПЕТ-виробу в цьому випадку приводять до наступних виразів:

$$\delta_3 = \delta_2 \frac{R_0}{R} \frac{l_2 + 2\pi R_0}{l_2 + 2\pi R}, \quad (9)$$

$$\lambda_3 = \frac{\delta_2}{\delta_3}, \quad (10)$$

$$\lambda_3 = \left(1 + \frac{\Delta R}{R_0}\right) \left(1 + \frac{2\pi \Delta R}{l_2 + 2\pi R_0}\right). \quad (11)$$

Залежності (9), (10), (11) характеризують зміну товщини ділянки ПЕТ-заготівки тільки на умовному етапі її радіального деформування.

Загальна ступень витягування λ та товщина стінки δ ділянки ПЕТ-виробу після формування будуть визначатися за наступними залежностями:

$$\delta = \delta_0 \frac{R_0}{R_0 + \Delta R} \frac{l_0 + 2\pi R_0}{l_0 + \Delta l_1 + \Delta l_2 + 2\pi(R_0 + \Delta R)}, \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{\delta_0}{\delta}, \quad (13)$$

$$\lambda = \left(1 + \frac{\Delta R}{R_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2 + 2\pi \Delta R}{l_0 + 2\pi R_0}\right). \quad (14)$$



Рис. 1 – ПЕТ-преформа та пляшка 0,5 л

Порівняння розрахункових і експериментальних даних виконаємо на прикладі формування пляшок ємністю 0,5 і 1 л з ПЕТ-преформ, загальною масою 20,71 г (рис. 1) та 32,23 г відповідно. Саме циліндрична частина, яка є основною частиною виробу, має найменшу, критичну товщину стінки. Для виконання розрахунків прийняті дані, що були отримані вимірюванням геометричних розмірів у циліндричній зоні преформи і виробу за допомогою цифрового вимірювального пристрою Sigma digital caliper, який забезпечував вимірювання з роздільною здатністю до другого знаку після коми, з точністю $\pm 0,02$ мм, похибка вимірювань складала біля 1 %.

Вимірювання виконувалися на відібраних характерних зразках без будь-яких дефектів.

Було відібрано по 10 ПЕТ-виробів, та виконано по 4 серії вимірювань в різних точках перетину. За експериментальні результати прийняті середні по 40-а точкам вимірювання значення. Значення середнього радіусу отримано наступним перерахунком:

$$R_0 = \frac{D_0 - \delta_0}{2}; \quad R = \frac{D - \delta}{2}; \quad (15)$$

де D_0, D – зовнішні діаметри ПЕТ-преформи і кінцевого виробу, відповідно.

Для ПЕТ-преформи 32,23 г (пляшка 1 л) отримані дані: $D_0 = 26,35$ мм; $\delta_0 = 2,76$ мм; $R_0 = 11,795$ мм; $l_0 = 74,66$ мм; $D = 81,16$ мм; $\delta = 0,29$ мм; $R = 40,435$ мм, $l = 158,31$ мм; $\Delta l_1 = 45$ мм; $\Delta l_2 = 38,65$ мм; $\Delta R = 27,99$ мм.

Для ПЕТ-преформи 20,71 г (пляшка 0,5 л) отримані дані: $D_0 = 22,39$ мм; $\delta_0 = 3,03$ мм; $R_0 = 9,68$ мм; $l_0 = 37,89$ мм; $D = 64,96$ мм; $\delta = 0,24$ мм; $R = 32,36$ мм, $l = 124,09$ мм; $\Delta l_1 = 45$ мм; $\Delta l_2 = 41,2$ мм; $\Delta R = 22,68$ мм.

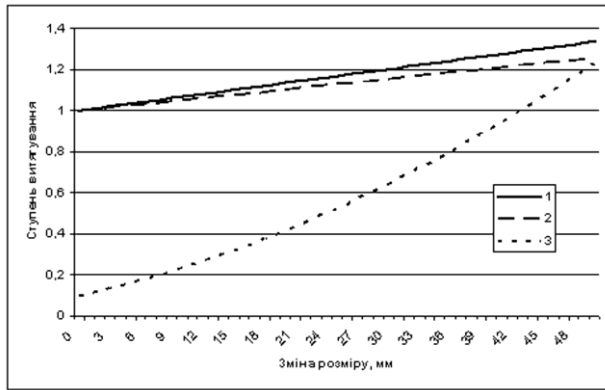
Розраховані та експериментальні значення порівнюються в табл. 1. Наведені в результаті відносяться до середньої ділянки ПЕТ-виробу.

Таблиця 1

№	Показник	Експеримент		Розрахунок		Похибка, %	
		32,23 г (1 л)	32,23 г (0,5 л)	32,23 г (1 л)	32,23 г (0,5 л)	32,23 г (1 л)	32,23 г (0,5 л)
1	преформа (пляшка)	32,23 г (1 л)	32,23 г (0,5 л)	32,23 г (1 л)	32,23 г (0,5 л)	32,23 г (1 л)	32,23 г (0,5 л)
2	δ , мм	0,29	0,24	0,297	0,268	2,41	11,7
3	λ_1	-	-	1,3	1,5	-	-
4	λ_2	-	-	1,2	1,23	-	-
5	λ_3			5,92	6,1	-	-
6	Δ	9,52	12,63	9,29	11,3	2,42	10,5

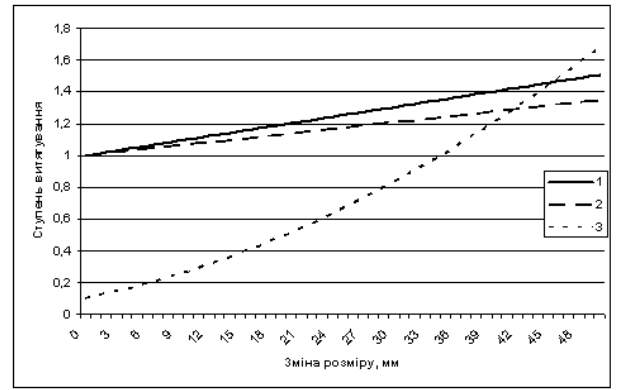
Як видно з даних табл. 1, максимальна похибка розрахунків відносно експерименту складає 11,7 % і є допустимою. Цікаво, що для ПЕТ-виробу малого типорозміру отримані похибки значно більші, ніж для ПЕТ-виробу більшого типорозміру. Таким чином, слід очікувати, що для ПЕТ-пляшок ємністю більше за 1 л, похибки розрахунків будуть досить малі.

Виконаємо аналіз етапів процесу формування ПЕТ-виробу. На рис. 2 та 3 наведено графіки залежності ступеня витягування від зміни розмірів ПЕТ-заготівки на всіх етапах процесу формування пляшок ємністю 1л та 0,5 л., відповідно. Для наочності діаграм, графіки залежності ступеню деформування від зміни радіусу ПЕТ-заготівки масштабовані 1:10. Рис. 2 і рис.3 дають уяву про вклад кожного фактору процесу деформування ПЕТ-заготівки. Можна відмітити, що осьове деформування ПЕТ-заготівки у реальних технологічних режимах не суттєво впливає на ступень деформування. Так, для пляшки ємністю 1 л при реалізованих у технологічному процесі параметрах $\Delta l_1 = 45$ мм, $\Delta l_2 = 38,65$ мм, ступень витягування складає $\lambda_1 = 1,32$ і $\lambda_2 = 1,76$, відповідно. Аналогічно, для пляшки ємністю 0,5 л при $\Delta l_1 = 45$ мм, $\Delta l_2 = 41,2$ мм отримано ступень витягування $\lambda_1 = 1,46$ і $\lambda_2 = 1,27$, відповідно. Таки величини ступеня витягування не можна вважати значними. Проте, радіальна складова деформування ΔR , яка складала для пляшки ємністю 1 л – 27,99 мм, а для пляшки 0,5 л – 22,68 мм, вносить дуже суттєвий вклад: ступень витягування в цьому випадку становить 5,92 і 6,05, відповідно. Таким чином, радіальна складова деформування у процесі формування ПЕТ-виробу у 4 – 5 разів більш суттєва ніж осьова



1 – перша фаза – витягування дорном; 2 – друга фаза – осьова складова деформування; 3 – друга фаза – радіальна складова деформування (масштабоване 1:10).

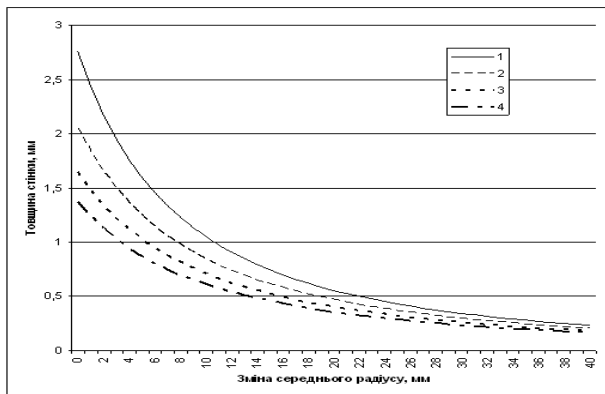
Рис. 2 – Залежність ступеня витягування від зміни розмірів ПЕТ-заготовки для пляшки ємністю 1л



1 – перша фаза – витягування дорном; 2 – друга фаза – осьова складова деформування; 3 – друга фаза – радіальна складова деформування (масштабоване 1:10).

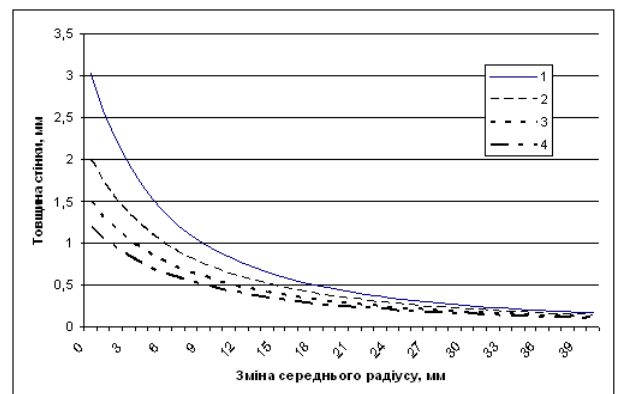
Рис. 3 – Залежність ступеня витягування від зміни розмірів ПЕТ-заготовки для пляшки ємністю 0,5 л

Оскільки встановлено, що вплив радіальної складової деформування ПЕТ-заготовки є вирішальним, то проаналізуємо її вплив на товщину отриманого ПЕТ-виробу. На рис. 4 і рис. 5 наведено графічні залежності товщини стінки ПЕТ-пляшки 1 л і 0,5 л відповідно, від зміни середнього радіусу ПЕТ-виробу у процесі формування. Деформування в осьовому напрямі $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$ вважається здійсненим. На графіках це безпосередньо відображається на початкових значеннях товщини стінки ПЕТ-виробу.



1 – $\Delta l = 0$ мм; 2 – $\Delta l = 50$ мм; 3 – $\Delta l = 100$ мм;
4 – $\Delta l = 150$ мм.

Рис. 4 – Залежність товщини стінки ПЕТ-пляшки ємністю 1 л від зміни середнього радіусу



1 – $\Delta l = 0$ мм; 2 – $\Delta l = 50$ мм; 3 – $\Delta l = 100$ мм;
4 – $\Delta l = 150$ мм.

Рис. 5 – Залежність товщини стінки ПЕТ-пляшки ємністю 0,5 л від зміни середнього радіусу

Зона мінімальної товщини ПЕТ-виробу розташована у центральній циліндричній частині ПЕТ-пляшки. Для достатніх механічних властивостей ПЕТ-пляшки, вона повинна мати мінімальну товщину стінки не менш ніж 0,2 мм. Як видно з наведених графіків, така товщина стінки досягається при значеннях ΔR , що дорівнюють приблизно 40 мм. Технологічно, такі значення ΔR не досягаються.

На графіках рис. 4 і рис. 5, найбільш цікавою з точки зору реалізації технологічного процесу є зона між кривими 2 ($\Delta l = 50$ мм) і 3 ($\Delta l = 100$ мм). Саме в таких режимах формуються пляшки найбільш використовуваних типорозмірів від 0,5 л до 2 л. Як видно з графіків, в цьому діапазоні типорозмірів слід очікувати зменшення товщини стінки ПЕТ-заготовки за рахунок радіальної складової деформування від приблизно 1,5–2 мм до приблизно 0,25–0,3 мм. Лише біля 15 % зменшення товщини стінки буде здійснено за рахунок сумарного осьового деформування Δl . Товщина стінки ПЕТ-виробу стрімко зменшується при збільшенні ΔR .

Якщо початкова товщина стінки ПЕТ-преформи для виготовлення ємності 1 л на 10 % менше за товщину ПЕТ-преформи для виготовлення ємності 0,5 л, то при наведених вище параметрах ПЕТ-преформ, за умовно прийнятих по графікам $\Delta l = 100$ мм і $\Delta R = 25$ мм, кінцева товщина стінки ПЕТ-пляшок ємністю 1 л буде на 14 % більше ніж товщина стінки ПЕТ-пляшок ємністю 0,5 л.

Таким чином, наведені дані можуть бути використані як для аналізу існуючих технологічних процесів виготовлення ПЕТ-виробів, так і для проектування нових.

Висновки. Розроблено методику оперативного оцінювання геометричних параметрів ПЕТ-виробу у процесі його формування з ПЕТ-преформи. Методика апробована на прикладі виготовлення ПЕТ-пляшок ємністю 1л і 0,5 л. Надані залежності для визначення ступеня витягування та товщини стінки на всіх фазах і етапах виготовлення ПЕТ-пляшки. Методика може бути використана як для аналізу існуючих технологічних процесів, так і для розробки нових виробів і технологій до них

Список використаної літератури

1. *Сідоров Д. Е* Аналіз температурних режимів формування ПЕТ-виробів / Д. Е. Сідоров, О. Є. Колосов, О. В. Погорілий, А. О. Гур'єва. // Збірник доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – С. 82–83.
2. *Сахаров А. С.* Исследование процесса формования профиля гофры при производстве гофрированных трубных изделий. / Д. Э. Сидоров, В. И. Сивецкий, А. Е. Колосов, А. С. Сахаров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 6. – С. 39–43.
3. *Сахаров А. С.* Аспекты формования профилей гофрированных трубных изделий. Часть 1. Моделирование параметров гофр разного профиля, а также формующего их оборудования / Д. Э. Сидоров, В. И. Сивецкий, А. Е. Колосов, А. С. Сахаров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 44–48.

Надійшла до редакції 26.10.2016