УДК 621.789

Моделювання процесу термоусаджування поліпропіленової плівки

О.Л. Сокольський, к.т.н., І.О. Мікульонок, д.т.н., І.А. Плахотний, НТУУ «КПІ», м. Київ

Полімерні плівки, які здатні зменшуватися у розмірі під впливом температури, що перевищує температуру розм'якшення полімеру, називають термоусаджувальними. Різні полімери мають неоднакові властивості під час усаджування, серед яких найбільш важливими є напруження та ступінь (коефіцієнт) усаджування. Коефіцієнт усаджування визначає кратність зменшення лінійних розмірів термоусаджувальної плівки, завдяки чому вона під час пакування набуває здатності щільно огортати продукцію, відтворюючи її зовнішні контури.

Процес пакування виробів у термоусаджувальну плівку складається з двох стадій [1]:

- формування заготовки плівки;
- усаджування плівки за допомогою обдуву її гарячим повітрям в термокамері або термотунелі.

З моменту контакту плівки з поверхнею продукції, яка упаковується, остання піддається дії зусиль, що виникають у плівці під час її усаджування (наприклад, для поліпропілену (ПП) воно становить 2–4 МПа). Внаслідок цього в місцях, де цей контакт відбувається занадто рано, продукція може деформуватись та втратити свій товарний вигляд, а плівка стане надто тонкою, аж до ймовірності розриву.

Проведені дослідження стосуються моделювання процесу термоусаджування та вдосконалення його для поліпшення рівнотовщинності плівки та мінімізації її силової дії на упаковану продукцію.

Було проведено експериментальні дослідження коефіцієнтів термоусаджування полімерної плівки з ПП марки BIPAN GT300 (Україна) залежно від температури процесу. Досліди проводились у термоусаджувальній камері, схему якої наведено на рис. 1.

Експериментальні дослідження проводили таким чином: зразок плівки закріплювали в губках встановленого в термоусаджувальній камері пристрою для розтягування, а після закінчення процесу термоусаджування вимірювали розміри зразка плівки та розраховували коефіцієнт усаджування за формулою

$$K_{ус} = \frac{L_0 - L}{L_0} 100\%,$$

де L_0 — початковий розмір зразка плівки, м; L — розмір зразка після усаджування, м.

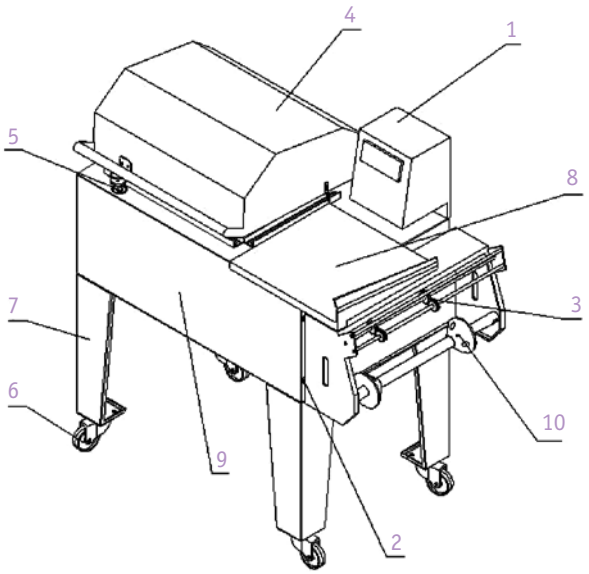

Рис. 1. *Термоусаджувальна камера: 1 — блок керування; 2 — механізм пересування робочого столу; 3 — механізм натягування плівки; 4 — кришка робочої камери; 5 — електромагніт; 6 — колесо для пересування; 7 — ніжка; 8 — робочий стіл; 9 — корпус; 10 — механізм подачі плівки*

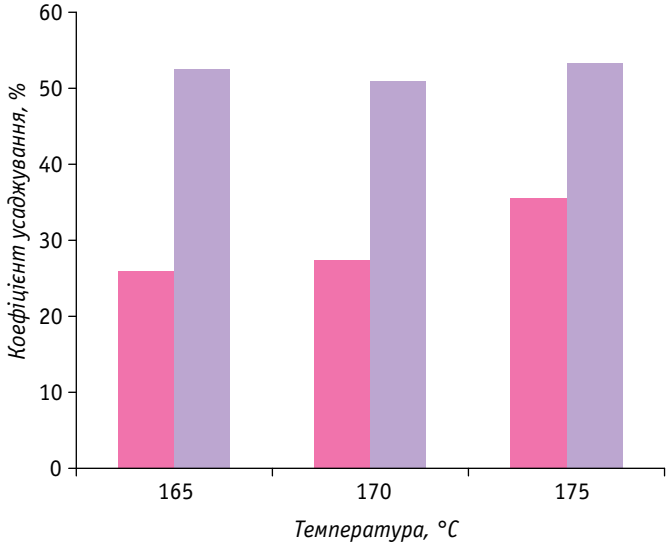

Рис. 2. *Залежність коефіцієнта усаджування плівки від температури: коефіцієнт усаджування в поперечному ($К_{ус\ поп}$ ■) та поздовжньому напрямах ($К_{ус\ пов}$ ■)*

Для дослідів було обрано робочі температури — 165, 170 і 175 °С. Визначивши коефіцієнти усадження в поперечному $K_{ус\ поп}$ і в поздовжньому $K_{ус\ пов}$ напрямах, було досліджено залежність поперечних та поздовжніх коефіцієнтів усаджування від температури (рис. 2) та часу усаджування (рис. 3).

Експериментальні дані показують, що за умови вільного усаджування плівки з ПП, коефіцієнт усаджування зростає зі збільшенням робочої температури. Найбільший коефіцієнт усаджування було отримано за температури 175 °С. Це зумовлено тим, що при збільшенні робочої температури та відсутності обмежувальних поверхонь, плівка розігрівається до більшої температури, що в свою чергу пришвидшує рухливість молекулярних структур плівки і дає змогу повернутися з лінійно орієнтованої до попередньої, термодинамічно вигіднішої глобулярної структури.

Числове моделювання процесу термоусаджування виконано у програмному комплексі ANSYS за допомогою програми POLYFLOW.

Як модель стану полімерної плівки було обрано модель тіла Максвелла. Вона якісно справедлива для в'язких матеріалів, що мають пружність (пружнов'язкі тіла) і добре описує повзучість полімерів у високоеластичному стані. Модель тіла Максвелла складається з ідеальної пружини і в'язкого елемента, з'єднаних послідовно. Як тільки до такої моделі прикладається напруження τ, пружина моментально розтягується, поршень починає рухатися в рідині з постійною швидкістю доти, доки величина τ підтримується постійною. За доволі високої частоти зміни напруження поршень майже не буде переміщуватися, і тіло загалом виявить лише пружні властивості, тобто перетвориться на ідеально пружне тіло.

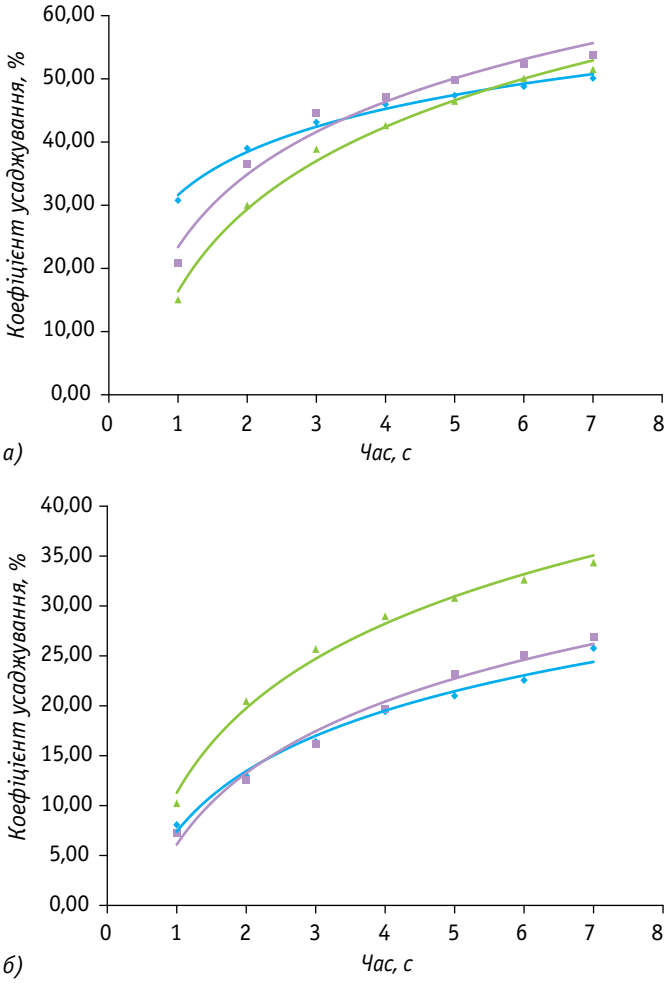

Рис. 3. *Залежність коефіцієнта усаджування плівки від часу в поперечному (а) та поздовжньому (б) напрямах за температури: 165 °С (◆), 170 °С (■), 175 °С (▲)*

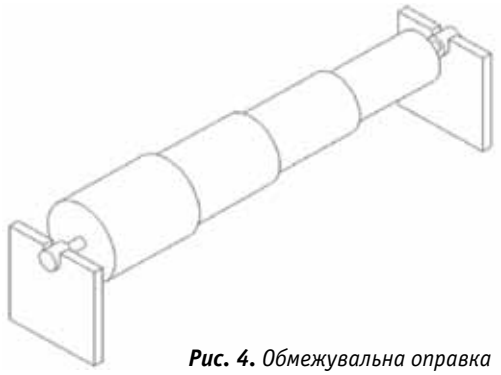

Рис. 4. *Обмежувальна оправка*

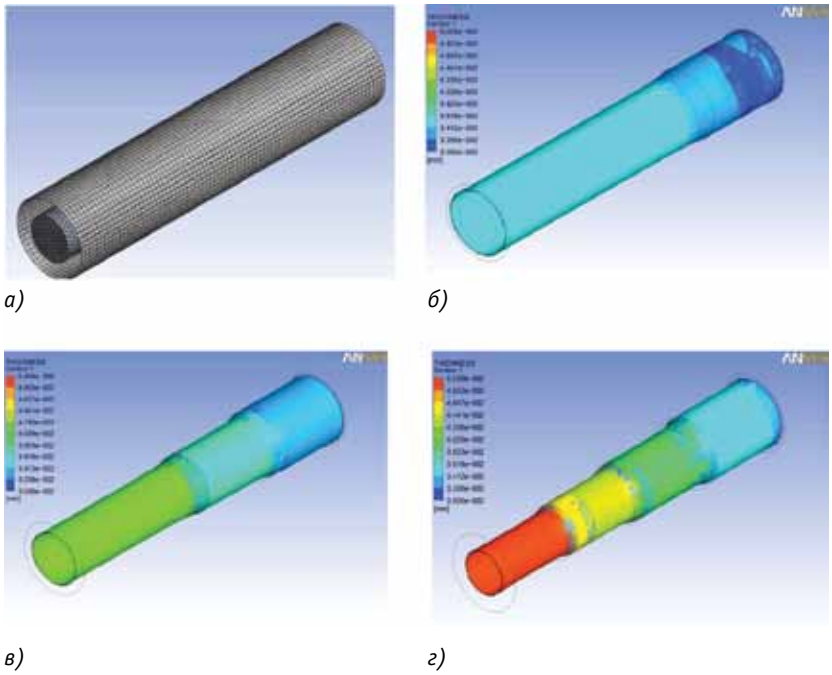

Рис. 5. *Результати моделювання процесу термоусаджування плівки з ПП із розподіленням по товщині плівки на різних стадіях процесу: в початковий момент часу (а); після 3 с усаджування (б); після 5 с усаджування (в); після 8 с усаджування (кінцева стадія) (г)*

Моделювання процесу термоусаджування проводилося за припущенням, що рукавна полімерна плівка з рівномірним розподілом по товщині була надіта на східчасту циліндричну оправку (рис. 4).

Так як в POLYFLOW термоусаджування як окремий різновид процесу відсутній, для моделювання скористалися типом задачі «Blow Molding» для моделювання таких нестаціонарних процесів з великим ступенем деформації об'єкта, як термоформування та видувне формування. Об'єкт моделювання складається з двох доменів: опорної поверхні (у нашому випадку — оправки), яка вважається недеформованою, та тонкої деформованої оболонки (тип підзадачі — Shell model).

Розрахунок складається з трьох етапів:

- переміщення плівки до початку її контакту з оправкою;
- термоусаджування плівки;
- оцінка розподілу товщини плівки після усаджування.

На рис. 5 представлено результати моделювання процесу термоусаджування плівки з ПП від початкової конфігурації на різних часових кроках. Кольором показано товщину плівки в мм.

Процес термоусаджування плівки з ПП відбувається за 8 с. Зі зменшенням діаметру оправки, товщина плівки після усаджування збільшується пропорційно відношенню початкового діаметру плівки до діаметру оправки. Темні плями на поверхні можна пояснити певною нестабільністю розрахунку через недостатню густоту розрахункової сітки внаслідок обмежених обчислювальних ресурсів.

Отримані результати добре корелюють з експериментальними. Таким чином, запропонована методика забезпечує одержання задовільних результатів розрахунку процесу термоусаджування. Надалі перспективним напрямом досліджень буде обґрунтування найбільш доцільної густоти розрахункової сітки та фізичних властивостей плівки.

Література

1. *Гавва О.М.* Пакувальне обладнання / О.М. Гавва, А.П. Беспалько, А.І. Волчко, О.О. Кохан. — К.: ІАЦ «Упаковка», 2010. — 583 с.

2. Патент № 93244 U Україна, МПК B29C 61/00. Спосіб упаковування в термоусадну полімерну плівку / О.Л. Сокольський, І.О. Мікульонок, І.А. Плахотний; опубл. 25.09.2014, бюл. № 18.

Моделирование процесса термоусадки полипропиленовой пленки

А.Л. Сокольский, к.т.н., И.О. Микулёнок, д.т.н., И.А. Плахотный

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований процесса термоусадки полипропиленовой термоусадочной пленки. Определены зависимости изменения коэффициента усадки полипропиленовой пленки в поперечном и продольном направлениях от температуры и времени прохождения процесса. Показаны результаты тестового численного моделирования процесса термоусадки.

Ключевые слова: термоусадка; полипропиленовая пленка; моделирование.

Simulation of the polypropylene film shrinkage process

A.L. Sokolskiy, Ph.D., I.O. Mikulenok, Dr., I.A. Plakhotniy

The results of the thermoshrinkable polypropylene film thermal shrinkage process experimental studies are studied. The depending shrinkage polypropylene film changes in the transverse and longitudinal directions of the temperature and the time of the process defined. Results of test numerical simulation of thermal shrinkage process are shown.

Keywords: thermal shrinkage; polypropylene film; numerical simulation.