

УДК 678.02

К.М. ДОРОНІНА,

А.І. ВОЛЧКО

Національний університет харчових технологій, м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО НАГРІВАННЯ НА ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНОЇ УПАКОВКИ МЕТОДОМ ТЕРМОФОРМУВАННЯ

Нагрівання матеріалу є однією з найбільш тривалих та відповідальних операцій у процесі термоформування упаковки. Застосування інфрачервоних випромінювачів значно прискорює виробничий процес та підвищує економічну ефективність. В цій статті розглянуто показники, які впливають на рівномірне нагрівання матеріалу і коротку методику розрахунку критерію рівномірності нагрівання матеріалу.

Ключові слова: інфрачервоне нагрівання, термоформування, рівномірність розподілу температури, одностороннє нагрівання, двостороннє нагрівання.

Існує загалом чотири способи нагрівання: конвективний, теплорадіаційний, контактний та змішаний. Конвективне нагрівання дає змогу отримати найкращі результати з точки зору рівномірності нагрівання, але теплорадіаційне нагрівання (нагрівання інфрачервоними випромінювачами) знижує тривалість циклу формування упаковки [1].

ІЧ-випромінювачі використовуються, наприклад, при виготовленні упаковки з полімерних матеріалів методами термоформування та інжекційно-видувного формування. При такому променевому впливі та наступній термообробці відбувається швидка фіксація форми упаковки. Діапазон температур, при яких матеріал має підвищену пластичність, так би мовити, губиться. При виборі нагрівача слід враховувати, що зі збільшенням потужності нагрівального елемента зростає інтенсивність випромінювання та скорочується довжина хвилі. Максимальна робоча температура поверхні випромінювачів складає 800 – 900 °С.

Метод нагрівання ІЧ-випромінювачами повинен задовольняти наступним вимогам [2]:

- матеріал повинен бути нагрітий до оптимальної температури формування рівномірно по всій площині;

- різниця між температурами з обох сторін листа повинна бути мінімальною;

- час нагрівання повинен бути якомога меншим, але надлишкового нагрівання матеріалу слід уникати через ризик термодеструкції полімеру;

- витрати енергії потрібно скорочувати наскільки це можливо (бажано досягти температури процесу якнайшвидше, і тому потужність нагрівання повинна бути регульована).

Нерівномірне нагрівання призводить до виникнення в листі внутрішніх напружень, нерівномірного витягування і утворення складок та зморщок в готовому виробі. Для створення рівномірного температурного поля підвищують температуру периферійних ділянок нагрівача з метою компенсації теплових втрат в навколишнє середовище. Якщо площа листа, який нагрівається, перевищує 0,5 м², то нагрівач повинен бути розділений на зони з індивідуальними регуляторами для диференційованого регулювання температури по всій поверхні листа. Допустимий перепад температури по поверхні листа становить $\pm (5 - 10) ^\circ\text{C}$.

© К.М. Дороніна, А.І. Волчко, 2012

По товщині листа слід уникати великої різниці температур, тому що така різниця дасть змогу отримати задовільні результати лише для найпростіших виробів. Якщо товщина листа не перевищує 2,5 мм, то матеріал можна нагрівати односторонньо, при товщині більше 2,5 мм та при нагріванні жорстких термопластів (полістирол, полікарбонат) рекомендується застосовувати двостороннє нагрівання листа [3]. Через невелику теплопровідність полімерів поверхня заготовки, яка звернена до ІЧ-випромінювача, розігрівається швидше, ніж внутрішні шари. Тому на поверхні заготовки можливе виникнення термічної деструкції, в той час як внутрішні шари матеріалу не встигають перейти зі склоподібного стану в високоеластичний. Найбільш вигідне застосування нагрівача при високих (понад 1000 К) температурах відзначається при нагріванні тонколистових термопластів. Товстолістові матеріали рекомендується нагрівати при менших температурах, щоб уникнути поверхневої термодеструкції.

Інтенсивність теплового потоку від нагрівача до заготовки, пропускна здатність якої дорівнює нулю, згідно закону Стефана-Больцмана для радіаційних нагрівачів визначається згідно формули

$$q = \bar{G}M(T_1^4 - T_2^4), \text{Вт/м}^2; \quad (1)$$

де $\bar{G}$ — стала Стефана-Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}^4)$; M — коефіцієнт променевипускання, T_1 і T_2 — температури відповідно нагріваючої та нагріваної поверхні, К.

Коефіцієнт променевипускання, в свою чергу, знаходять з формули

$$M = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad (2)$$

де ε_1 і ε_2 — ступінь чорноти відповідно нагріваючої і нагріваної поверхні.

Для одностороннього нагрівання заготовки температура на обігрівній поверхні визначається з формули

$$T_{\max} = T_0 + \frac{q\delta_{\text{зар}}}{\lambda} \left[\frac{\sigma\tau}{\delta_{\text{зар}}^2} + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \right], \quad (3)$$

а на необігрівній поверхні

$$T_{\min} = T_0 + \frac{q\delta_{\text{зар}}}{\lambda} \left[\frac{\sigma\tau}{q\delta_{\text{зар}}} - \frac{1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\pi^2 n^2 \frac{\sigma\tau}{q\delta_{\text{зар}}}\right) \right], \quad (4)$$

де T_0 — початкова температура заготовки, К; $\delta_{\text{зар}}$ — товщина заготовки, м; λ — коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; σ — коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{год}$; τ — час нагрівання, год; n — коефіцієнт, що характеризує час релаксації.

Для варіанту двостороннього нагрівання $T_{\max}$ розраховується для зовнішніх поверхонь заготовки, а $T_{\min}$ — для серединної поверхні, при цьому у рівняння (3) і (4) замість величини $\delta_{\text{зар}}$ підставляється значення $\delta_{\text{зар}}/2$.

В якості критерію рівномірності розподілу температури використовується наступний критерій

$$I_{\text{н}} = \frac{T_{\max} - T_0}{T_{\min} - T_0}. \quad (5)$$

Порівнюючи рівняння (3) і (4) можна записати

$$I_{\text{н}} = f\left(\frac{\sigma\tau}{\delta_{\text{зар}}^2}\right), \quad (6)$$

Даний метод розрахунку є найпростішим та найдоступнішим, але він не враховує нестационарний режим нагрівання заготовок та передбачає лінійний розподіл температур по товщині матеріалу.

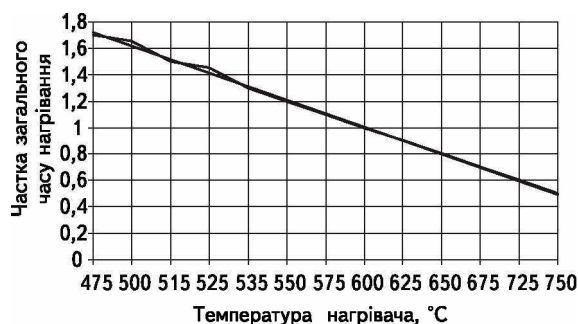


Рис. 1. Зміна часу нагрівання як функція температури нагрівального елемента для керамічних нагрівачів (час наведено в умовних частках, за одиницю прийнято час при відстані 200 мм та температурі нагрівачів 600 °C)

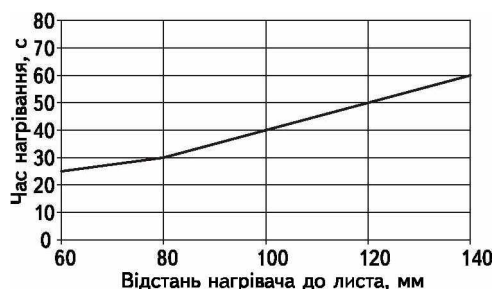


Рис. 2. Зміна часу нагрівання як функція відстані від нагрівального елемента до матеріалу

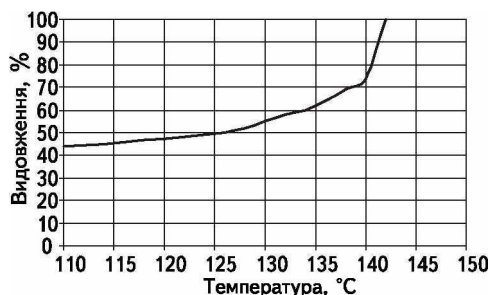


Рис. 3. Зміна видовження зразка з поліпропілену при різних температурах (навантаження 5 Н)

Висновки. Ступінь поглинання матеріалом інфрачервоного випромінювання залежить від типу матеріалу, характеру його поверхні, структури, властивостей та частотної характеристики випромінювання. При виготовленні упаковки досягнення необхідної температури формування та її рівномірного розподілу по матеріалу відбувається шляхом регулювання багатьох факторів, зокрема часу нагрівання, температури випромінюючої поверхні, відстані від нагрівача до заготовки, вибору оптимальної форми випромінюючої поверхні нагрівача, розбивання нагрівачів на кілька зон при великій площі поверхні заготовки тощо.

До недоліків інфрачервоного нагрівання відноситься нерівномірність розподілу температури в матеріалі. Але застосування інфрачервоних випромінювачів значно прискорює виробничий процес та підвищує економічну ефективність. Тому використання інфрачервоних нагрівачів у процесах виготовлення полімерної упаковки є доцільним.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ефремов Н.Ф. Тара и ее производство. Производство тары из полимерных пленок и листов: учеб. пособие/ Николай Федорович Ефремов; Моск. гос. ун-т печати. — М.: МГУП, 2009. — 341 с. — ISBN 978-5-8122-1010-6.
2. Шварцманн П. Термоформование. Практическое руководство/ П. Шварцманн, А. Иллиг; пер. с англ. М.А. Шерышев — СПб.: Профессия, 2009. — 288с. — ISBN 978-5-93913-117-9. — ISBN 3-446-21451-8 (Carl Hanser Verlag). — ISBN 1-56990-275-5 (Hanser Gardner Publications).
3. Шерышев М.А. Пневмо-вакуумформование/ Михаил Анатольевич Шерышев. — СПб.: Профессия, 2010. — 192 с. — ISBN 978-5-91884-004-7.

Нагрев материала — одна из наиболее длительных и ответственных операций в процессе термоформования упаковки. Применение инфракрасных излучателей значительно ускоряет производственный процесс и повышает экономическую эффективность. В этой статье рассмотрены показатели, влияющие на равномерное прогревание материала и краткую методику расчета критерия равномерности нагревания материала.

Ключевые слова: инфракрасный нагрев, термоформование, равномерность распределения температуры, односторонний нагрев, двухсторонний нагрев.

K.M. Doronina, A.I. Volchko

Research the influence of parameters of infrared heating on the forming process of plastic packaging by thermoforming

The heating of material is one of the longest and most responsible operations in the process of thermoforming. Using infrared radiators can significantly speeds up the production process and increases economic effectiveness. Besides, infrared heat warms the environment less, than other types of heating. In this article are described indicators, that influence on the equal heating of material and short calculation of the indicator of uniformity of heating. By adjusting, for example, such parameters as temperature of the heating element, heating time, distance from the heater to the sheet for a specific material with prescribed thickness, it is possible to define the optimum values for the energy efficiency of thermoforming and the required quality of final products.

Key words: infrared heating, thermoforming, uniform temperature distribution, one-sided heating, two-sided heating.

Одержана редколегією 13.04.2012 р.