

to design a system of optimal management of the recipe of raw materials in the production of technical carbon, was stressed. This development will optimize the use of available resources to increase the production of carbon black and reduce the unit cost of production. This will increase the economy of production and competitiveness by increasing the speed, reducing the financial costs and will give the opportunity to direct qualified human resources to solve other pressing problems. For the convenience of further practical use, it is suggested to find optimal controls for many different values of the initial states of the object, followed by approximation. This will allow the proposed algorithms to be used with fewer technical resources.

**Keywords:** carbon black, correlation index, optimal control system.

#### Referenses

1. Notch: CarbonBlackGlobal Outlook 7-9.11.17. URL: [www.carbonblack2017.com/userfiles/file/Presentation/01-Mr\\_Paul\\_Ita .pdf](http://www.carbonblack2017.com/userfiles/file/Presentation/01-Mr_Paul_Ita.pdf) (Accessed January 28, 2018).
2. Ivanovskij V. I. (2004). *Tekhnicheskij uglerod. Processy i apparaty* [Carbon black. Processes and devices], Tekhuglerod, Omsk, Russia.
3. Orlov V. YU. Komarov A. M., Lyapina L. A. (2002). *Proizvodstvo i ispol'zovanie tekhnicheskogo ugleroda dlya rezin* [Production and use of carbon black for rubber], Aleksandr Rutman, Yaroslavl, Russia.
4. Havrysh B. A., Korzhyk M. V. (2017). "Analysis of the mixer in the production of carbon black", *Avtomatyzaciya ta komp'yuterno-integrovani tehnologiyi: Tezy` dopovidej XI-yi naukovo-prakty`chnoyi konferenciyi studentiv* [Automation and Computer-Integrated Technologies: Abstracts of the XIth Students Scientific and Practical Conference], Kyiv, Ukraine, December 06-07, 2017, pp. 5-6.
5. M. S. Cekhanovich, L. A. Klimanova, S. D. Faruncev (1985). Certificate of authorship 1307304 USSR, MKI G 01 N 11/00. "The method for determining the correlation index of raw materials for the production of carbon black"
6. Havrysh B. A., Korzhyk M. V. (2017). "Development of mathematical model of mixer in the production of technical carbon", *Avtomatyzaciya ta komp'yuterno-integrovani tehnologiyi: Tezy` dopovidej Pyatoyi naukovo-prakty`chnoyi konferenciyi studentiv* [Automation and Computer-Integrated Technologies: Abstracts of the Fifth Students' Scientific and Practical Conference], Kyiv, Ukraine, April 11-12, 2018, pp. 53-55.
7. DSTU 8363:2015 Coke raw materials for the production of carbon black. Specifications/ National Standard of Ukraine. – Kyiv: State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality", 2015. – 29 p.

---

УДК 678.023.3

**СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., к.т.н., доц.; СІМОНЧУК Є. П., студентка**  
**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

## **МОДЕЛЮВАННЯ УСАДКИ ПОЛІМЕРНОГО ВИРОБУ В ПРОЦЕСІ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ**

*Проведено числове моделювання процесу лиття під тиском. Розглянуто лиття тонкостінного виробу типу «кришка» із поліетилену низької густини. Показано результати моделювання, що дозволили виявити залежність деформації, середньої усадки, часу перебування у формі та часу заповнення від температури форми. Виявлено, що зі збільшенням температури форми зменшується деформація виробу, необхідний тиск лиття та час заповнення форми, проте збільшується середня усадка та час перебування у формі.*

**Ключові слова:** моделювання, лиття, деформація, усадка.

**DOI: 10.20535/2617-9741.1.2019.171203**

© Сокольський О. Л., Сімончук Є. П., 2019

**Постановка проблеми.** Лиття під тиском є одним з основних способів переробки пластмас, який дає змогу виготовляти деталі простої і складної форми. Для виготовлення деталей використовують термопласти без наповнювачів (полістирол, поліетилен, капрон, лавсан, поліуретан тощо) або із дисперсними

наповнювачами. Метод високопродуктивний, економічний і дозволяє повністю автоматизувати виготовлення виробів із полімерів [1].

Беручи до уваги безліч параметрів, що впливають на виготовлення деталей, оператори, стикаючись з дефектами на відлитої виробів, часто вагаються з вибором правильного засобу для їх усунення. Дії, зроблені навмання, і поодинокі заходи рідко призводять до успіху. Основними передумовами для систематичного визначення, аналізу причин і усунення дефектів деталей є оптимальна конструкція прес-форми, правильне налаштування машини і встановлення раціональних технологічних параметрів лиття.

Деформація характеризується відмінністю деталі від бажаної форми – згинання або скручування, яке відбувається після вилучення з форми, або через якийсь час. Як правило, плоскі вироби деформуються хвилями, прямі кромки загинаються всередину або назовні, або скручуються. Причини деформації можуть бути зумовлені параметрами чи конструкцією: тиск лиття занадто високий; температура прес-форми занадто низька; швидкість розплаву занадто низька; температура маси занадто низька; нерівномірна температура прес-форми; різна товщина стінок.

Спосіб усунення деформації: знизити тиск витримки; підвищити температуру прес-форми; підвищити швидкість впорскування; підвищити температуру циліндра; охолоджувати прес-форму рівномірно і витримувати температурний режим; змінити геометричну форму виробу з урахуванням природи полімеру [2].

**Аналіз попередніх досліджень.** В роботі [3] визначено, що певну конфігурацію і розміри виріб приймає в формі, коли полімер знаходиться в розплаві зі зниженою густиною, а подальше охолодження викликає зміну об'єму полімеру і відповідно зменшення лінійних розмірів виробу, тобто появу усадки. Усадка  $Y$  (%) характеризує зменшення лінійних розмірів виробів по відношенню до розмірів формуючого інструмента:

$$Y = \frac{l_{\phi} - l_{\sigma}}{l_{\phi}} \cdot 100, \%$$

де  $l_{\phi}$  - розмір формуючої порожнини при 20°C;  $l_{\sigma}$  - розмір виробу при 20 ° C.

Внаслідок того, що більшість виробів формується за рахунок зсувної течії і відбувається орієнтація макромолекул, з'являється анізотропія усадки, тобто розміри виробів в різних напрямках змінюються неоднаково. Анізотропія усадки  $\alpha_y$ , визначається за формулою

$$\alpha_y = Y_{\parallel} / Y_{\perp}$$

де  $Y_{\perp}$  - усадка в напрямку, перпендикулярному течії;  $Y_{\parallel}$  - усадка вздовж напрямку течії.

**Метою** досліджень є проведення числових досліджень процесу лиття під тиском під дією таких вхідних факторів, як температура розплаву та форми, час перебування у формі для того, щоби мінімізувати деформацію та усадку деталі.

**Виклад основного матеріалу.** Математична модель описує метод одиничного аналізу варіацій згідно [4].

Одиничний аналіз варіацій - це метод, що надається в аналітичному продукті Autodesk Simulation Moldflow Warp, щоб ізолювати домінуючу причину викривлення і дозволити здійснити цілеспрямовані заходи для зменшення деформації деталі. Розглянемо, як метод залишкової напруги застосовується в контексті єдиного аналізу.

Аналіз Fill + Pack фаз наповнення і пакування виводить наступну інформацію, яка служить в якості вхідних даних для розрахунків залишкового напруження:

- Узагальнені дані про сили;
- Мембранні сили  $(N_x, N_y, N_{xy})$  і згинальні моменти  $(M_x, M_y, M_{xy})$ , на кожному елементі в локальній системі елементарних осей,
- Кути орієнтації матеріалу для кожного елемента,
- Механічні властивості для кожного елемента (подовжній модуль Юнга, поперечний модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона).

Одиничний аналіз варіацій заснований на концепції, згідно з якою причини короблення діляться на три категорії:

- Диференціальне охолодження,
- Диференціальна усадка,
- Орієнтаційні ефекти.

Ця концепція стосується усадки, а не напружень. Тому щоб ізолювати причину вищезазначеної деформації при використанні моделі залишкового напруження, нам потрібно розрахувати узагальнене напруження з даних узагальнених сил, потім розкласти деформації на компоненти внаслідок диференційного охолодження, різної усадки і нарешті, перетворити змінені напруження назад у відповідні узагальнені сили. Потім проводиться окремий аналіз напружень для отримання результатів деформації для кожного ефекту. Нижче наводяться відповідні рівняння для розрахунків.

Закон Гука для поперечно-ізотропного матеріалу може бути виражений як:

$$\{\varepsilon\} = [S^f] \cdot \{\sigma\}$$

де

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}\}^T \cdot [S^f] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix}.$$

В якості альтернативи закон Гука можна записати в такий спосіб

$$\{\sigma\} = [D^f] \cdot (\varepsilon),$$

де

$$[D^f] = \frac{1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \cdot \begin{bmatrix} E_{11} & \nu_{21} E_{11} & 0 \\ \nu_{21} E_{11} & E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix}.$$

Враховуючи кут орієнтації матеріалу, ми перетворимо матрицю відповідності і матрицю жорсткості з орієнтованої системи в локальну систему.

Узагальнені деформації:

$$\begin{cases} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases} = \frac{1}{h} \cdot \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{cases} = \frac{12}{h^3} \cdot \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{cases}$$

де  $\{\varepsilon\}$  і  $\{K\}$  - відповідно вектори деформації і кривизни.

Наступні рівняння перетворюють вектори деформації і кривизни назад до мембранних сил і згинаючих моментів:

$$\begin{cases} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{cases} = h \cdot \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases},$$

$$\begin{cases} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{cases} = \frac{h^3}{12} \cdot \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{cases}.$$

Щоб ізолювати ефекти усадки, ми замінюємо і розкладаємо компоненти, потім перераховуємо мембранні сили і згинальні моменти і використовуємо нові значення в структурному аналізі [4].

Граничні та початкові умови:

- Форма і розміри формуючої порожнини;
- Теплофізичні, реологічні та механічні властивості перероблюваного матеріалу, які визначають залежно від його складу та температури;
- Температура розплаву на вході в форму та температура стінок форми.

Для моделювання процесу лиття в системі Autodesk Simulation Moldflow було взято геометрію деталі «Кришка» (рис.1). Перероблюваним матеріалом обрано поліетилен високого тиску LDPE 4012 від Dow Chemical USA. На рис. 2 зображена деформація по діаметру (відносно осі X) при рекомендованій температурі форми 40°C та розплаву 220°C.

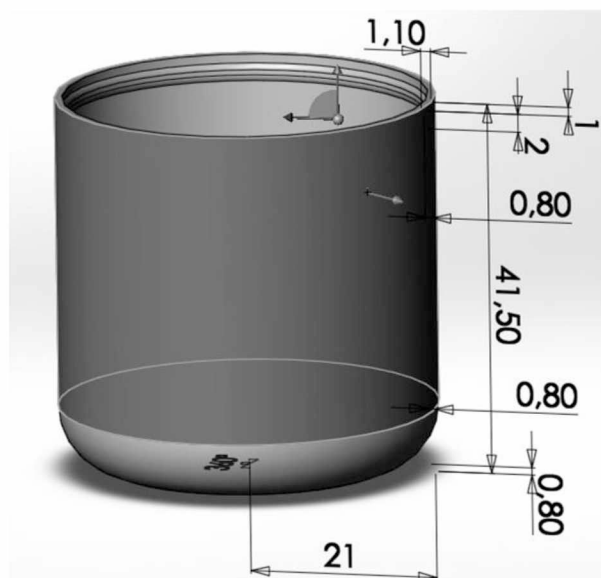


Рис. 1 – Геометрія деталі «Кришка»

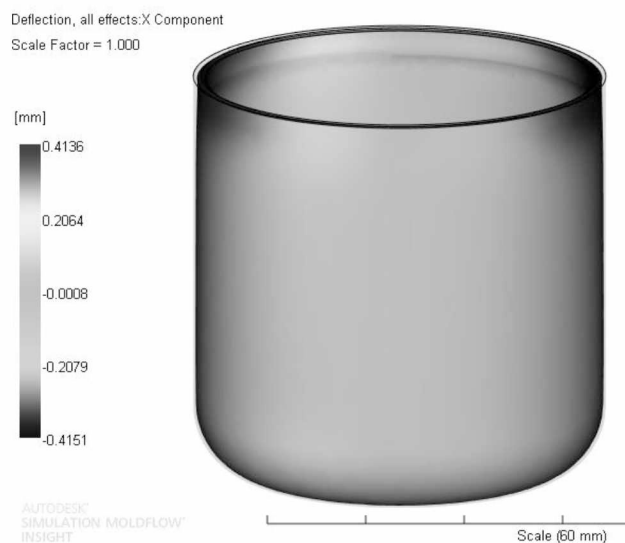


Рис. 2 – Деформація деталі відносно осі X, мм

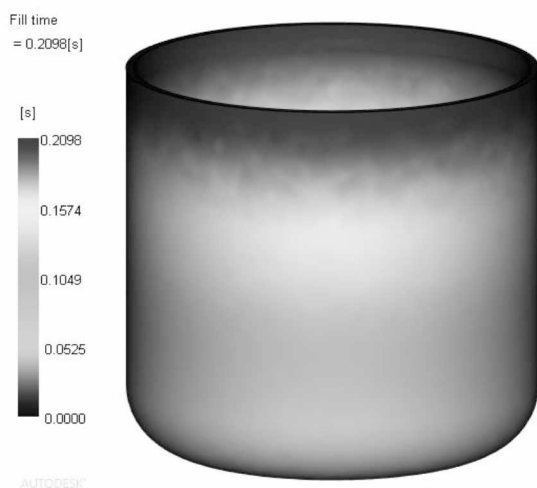


Рис. 3 – Час заповнення форми, с

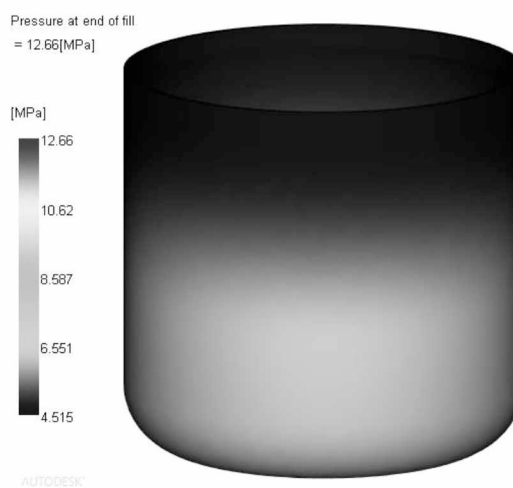
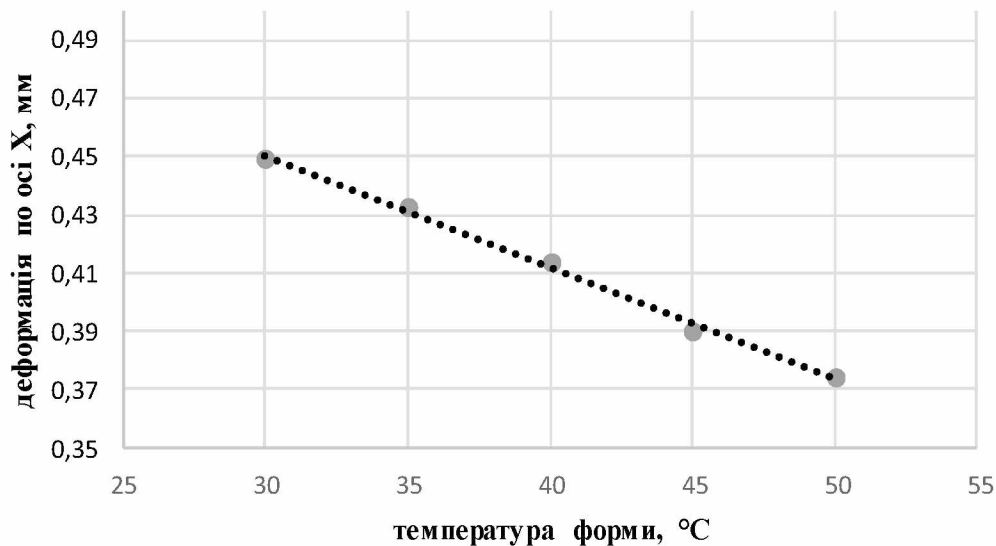


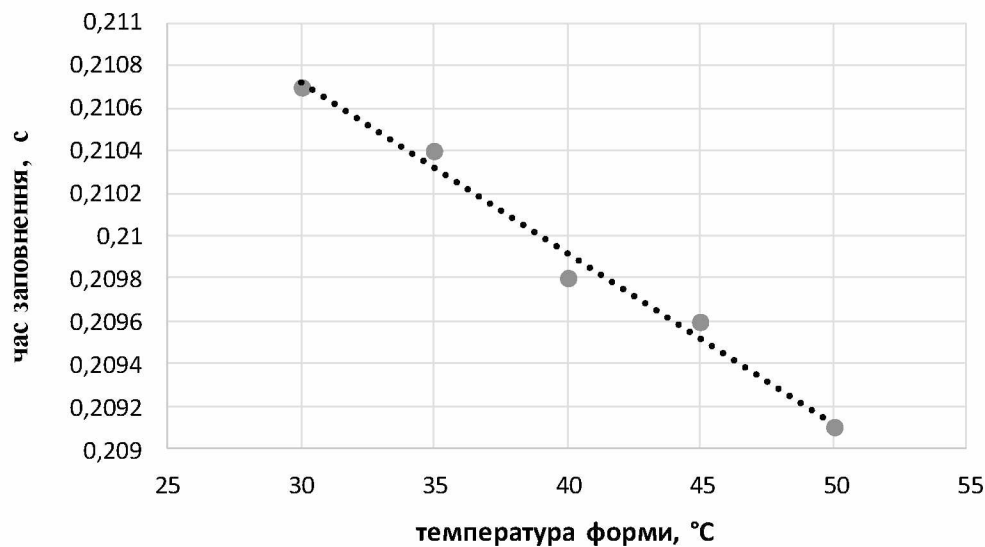
Рис. 4 – Тиск після заповнення форми, МПа

Результати моделювання дозволили також встановити мінімально необхідні час заповнення форми (рис. 3), який складає 0,21 с, та тиск лиття (рис. 4), який становить 12,66 МПа.

Для встановлення залежності параметрів процесу лиття від температури форми було проведено цикл розрахунків, результати яких наведено на рис. 5–8.



**Рис. 5 – Графік залежності деформації по діаметру від температури форми**



**Рис. 6 – Графік залежності часу заповнення від температури форми**

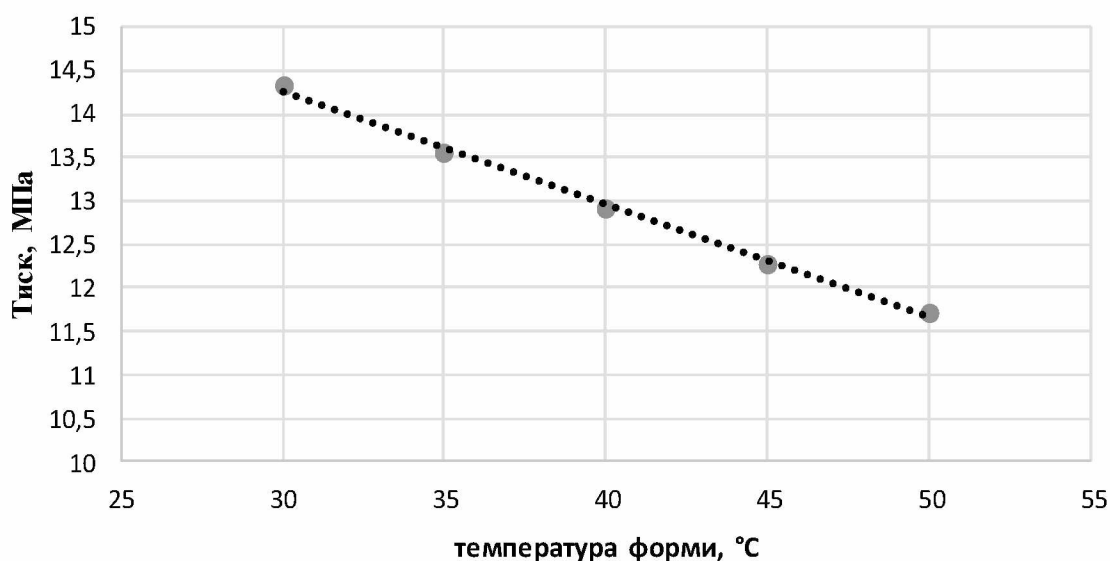


Рис. 7 – Графік залежності тиску від температури форми

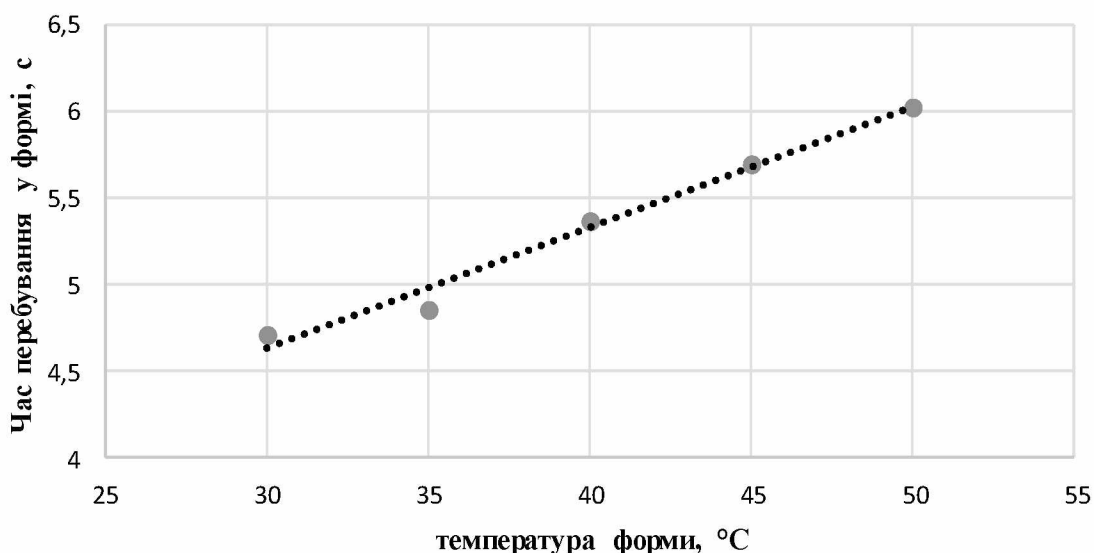


Рис. 8 – Графік залежності часу перебування у формі від температури форми

З графічних залежностей видно, що зі збільшенням температури форми, зменшується деформація виробу, необхідний тиск лиття та час заповнення форми, проте збільшується час перебування у формі. Тобто збільшення температури форми позитивно впливає на більшість параметрів процесу лиття та якість виробу, проте знижує продуктивність.

**Висновок.** Проведені числові дослідження процесу лиття дозволили встановити доцільну температуру форми при незмінній температурі розплаву. Моделювання процесу лиття дало змогу виявити взаємозв'язок між усадкою, деформацією, часом заповнення та часом перебування деталі у формі. Проведені числові дослідження показали ефективність методики одиничного аналізу варіацій.

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

**Список використаної літератури**

1. Лиття під тиском: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Лиття\\_пластмас\\_під\\_тиском](https://uk.wikipedia.org/wiki/Лиття_пластмас_під_тиском).
2. Бихлер М. Детали из пластмасс: отливать без дефектов: Учеб. пособие. – Хьюитт ГмбХ, 1999. – 464 с.
3. Shrinkage of plastic products <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp>
4. Method for predicting residual stress shrinkage <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp>

Надійшла до редакції 24.12.2018

---

*Sokolskyi O. L., Simonchuk Y.P.*

**MODELING OF POLYMER PRODUCTS SHRINKAGE IN INJECTION MOLDING**

*Injection molding is one of the main ways of plastics processing, which allows to produce parts of simple and complex shapes. There are used thermoplastics without fillers or particulate fillers for the producing tools. The main prerequisites for the systematic identification, analysis of causes and elimination of tools' defects is the optimal design of the mold, the correct setting of the machine and the establishment of rational technological parameters of molding.*

*The deformation is characterized by the distinction of the part from the desired shape. Causes of deformation can be due to settings or design. Ways to eliminate the deformation is to decrease the dwell pressure; increase the temperature of the mold and to increase the injection speed; increase the temperature of the cylinder; cooling the mold uniformly and to withstand the temperature regime; change the geometric shape of the product taking into account the nature of the polymer.*

*A specific configuration and dimensions of the product takes form and further cooling causes a change in volume of the polymer and the reduction of linear dimensions, that is, the appearance of shrinkage. Shrinkage describes the reduction of linear dimensions relative to the size of the form.*

*The aim of the research is to conduct numerical studies of the process of injection molding by the action of such factors as the temperature of the melt and shape, stay in shape in order to minimize deformation and shrinkage details.*

*The thin-walled casting product of the "cover" type from low density polyethylene has been considered. It is shown, the simulation results helped to identify the dependence of the deformation, the average shrinkage of time staying in shape and time of temperature completion of the form. The simulation results also allowed to set the minimum required time of mold filling and pressure drop. From the simulation results it is seen that with increasing temperature decreases the deformation of the product, the necessary pressure drop and time of form filling, however, increases the time of stay in shape.*

*That is, the increase in temperature has a positive effect on most parameters of the injection molding and the quality of the product, but reduces performance.*

**Key words:** modeling, injection molding, deformation, shrinkage.

**References**

1. Injection moulding : [https://en.wikipedia.org/wiki/Injection\\_moulding](https://en.wikipedia.org/wiki/Injection_moulding).
2. Bichler M. Detaly iz plastmass: otlyvat' bez defektov: Ucheb. posobye [Plastic parts: cast without defects: Tutorial]. – Hudig GmbH, 1999. – 464.
3. Shrinkage of plastic products <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp>
4. Method for predicting residual stress shrinkage <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp>