

УДК 621.789

СІМОНЧУК Є. П., СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ЛІНІЙ СПАЮ

**Мета.** Метою досліджень є аналіз критеріїв утворення ліній спаю та мінімізація їх утворення за допомогою підбору таких параметрів режиму лиття, як температура форми та температура розплаву.

**Методика.** Для прогнозування утворення ліній спаю при литті полімерів під тиском розроблено комп'ютерну розрахункову модель і визначено діапазон температур розплаву та форми при яких лінія спаю для представленої деталі буде відсутня. За один із критеріїв утворення ліній спаю пропонується взяти кут зустрічі фронтів потоків розплаву, за інший критерій – температуру таких фронтів. За приклад деталі, отриманої методом лиття під тиском, було обрано виріб у формі лопатки, які застосовуються для випробувань на міцність. Перероблюваним матеріалом вибрано композицію полівінілхлориду.

**Результати.** Для аналізу залежності ліній спаю від температури форми були проаналізовані числові дослідження таких параметрів, як кут зустрічі фронтів потоків та температура фронтів потоків при певних температурах форми. Підтверджено вплив температури розплаву на ступінь утворення дефекту типу ліній спаю. Правильно підібрана температура форми та розплаву для полімерної деталі, що формується методом лиття під тиском, сприяє усуненню дефекту. Кут спаю набуває мінімального значення при температурі розплаву 210 °С і температурі форми 55–65 °С. Підвищення температури на лінії спаю прямо пропорційне підвищенню температури розплаву. Лінія спаю при температурі розплаву 185 °С і нижче відсутня.

**Наукова новизна.** Створено математичну модель неізотермічної течії ламінарних потоків неньютонівської рідини, яка описує процес заповнення прес-форми під час лиття під тиском. Підтверджено вплив температури розплаву на параметри ліній спаю. Оптимальна температура розплаву для усунення ліній спаю є 180–185 °С, а температура форми 80 °С.

**Практична значимість.** Числове моделювання процесу утворення ліній спаю дозволяє підібрати температуру форми та розплаву, за рахунок чого буде мінімізований дефект готової деталі.

**Ключові слова:** лиття; лінія спаю; математична модель; числове моделювання.

**Вступ.** Лиття під тиском – найпрогресивніший і найпопулярніший метод переробки полімерів, оскільки дозволяє отримувати вироби достатньо складної конфігурації при відносно невеликих затратах праці та енергії.

Довговічність та якість виробів з полімерів, отриманих даним методом залежить від фізико-механічних властивостей в області, на яку здійснюється найбільший тиск в процесі експлуатації [1].

При литті певних деталей можуть бути застосовані декілька ливників, або ж прес-форма може мати певні особливості та перешкоди, які обтікаються розплавом полімерного матеріалу, в цих випадках у відлитих виробах можуть утворюватись лінії спаїв [2].

Найчастіше області спаїв характеризуються нижчими показниками механічних властивостей, ніж інші ділянки полімерних виробів [3].

Згідно [2] існує три види спаїв при заповненні прес-форм полімерним розплавом:

- Спаї, що утворені при паралельному усі потоків розплаву;
- Спаї, що утворені при зустрічному русі потоків розплаву;
- Спаї, що утворені при обтіканні полімерним матеріалом перешкоди.

Орієнтація ліній спаю відносно напрямку дії руйнівного навантаження впливає на властивості експлуатації відлитих виробів. В роботі [2] встановлено підтвердження того, що

відношення міцності вздовж лінії спаю до міцності поперек спаю у таких матеріалах, як полістирол, складає  $1,34 \div 1,44$ .

Області ліній спаю в готових виробах можна визначити за розташуванням та орієнтацією ливникових каналів відносно порожнини [3].

Сучасні прес-форми не можуть дати гарантію відсутності ліній спаю, проте їх відсутність ми можемо забезпечити за допомогою підбору таких параметрів режиму лиття, як температура форми температура розплаву, швидкість уприскування, час охолодження, тиск та час витримки під тиском.

**Постановка завдання.** Метою досліджень є аналіз критеріїв утворення ліній спаю та мінімізація їх утворення за допомогою підбору таких параметрів режиму лиття, як температура форми та температура розплаву. За один із таких критеріїв пропонується взяти кут зустрічі фронтів потоків розплаву, за інший критерій – температуру таких фронтів.

**Аналіз досліджень процесу лиття та утворення ліній спаю.** Математичну модель неізотермічної течії ламінарних потоків неньютонівської рідини можна записати системою рівнянь, яка включає рівняння нерозривності, записаного для нестисливого середовища, нестационарне рівняння збереження кількості руху та рівняння енергії:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u &= 0 \\ \rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right] &= -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} \\ \sigma &= -pI + \eta(\nabla u + \nabla u^T) \\ \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) &= \nabla \cdot (k \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;

$\nabla$  – оператор Гамільтона, м<sup>-1</sup>;

$u$  – вектор швидкості, м/с;

$t$  – час, с;

$p$  – зовнішній тиск, Па;

$\sigma$  – тензор напружень, Па;

$\bar{\bar{\tau}} = 2\eta(\dot{\gamma})\mathbf{D}$  – тензор в'язких напружень другого рангу, Па;

$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla)$  – тензор швидкості деформації, с<sup>-1</sup>;

$\eta(\dot{\gamma})$  – в'язкість рідини як функція другого інваріанта  $\dot{\gamma}$  від  $\mathbf{D}$ , Па·с;

$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \mathbf{D} : \mathbf{D}}$  – другий інваріант від  $\mathbf{D}$ , або швидкість зсуву у разі одновимірної

течії, с<sup>-1</sup>;

$T$  – температура, К;

$k$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

$C_p$  – питома теплоємність.

Закон в'язкості для неньютонівської рідини має вигляд:

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad (2)$$

де

$$\eta_0(T) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \quad (3)$$

де  $\eta$  – динамічна в'язкість рідини, Па·с;

$\eta_0$  – в'язкість за нульового зсуву, Па·с;

$\tau^*$  – параметр області переходу між нульовою швидкістю зсуву та степеневою областю кривої в'язкості, Па;

$T$  – поточна абсолютна температура рідини, К;

$T_0$  – абсолютна температура відліку, К.;

$E$  – енергія активації в'язкої течії, Дж;

$\dot{\gamma}$  – другий інваріант  $\mathbf{D}$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;

$n$  – показник ступеня, який визначає клас рідини.

Функція об'ємної частки  $f$  вводиться для відстеження еволюції фронту розплаву [4, 5]. Тут  $f = 0$  визначається як повітряна фаза,  $f = 1$  як фаза розплаву полімеру, і тоді фронт розплаву розташований всередині осередків з  $0 < f < 1$ . Просування  $f$  з часом регулюється наступним рівнянням переносу:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (uf) = 0 \quad (4)$$

Швидкість потоку або тиск впорскування вказується на вході в форму.

Ковзання полімерного матеріалу на стінці форми не передбачається, тобто застосовується гранична умова прилипання. Для гіперболічного рівняння переносу функції об'ємної частки необхідна гранична умова впуску.

За початкові умови системи рівнянь (1) приймаються розподіл полів компонент вектору швидкості  $u_0$  і тиску  $p_0$  в момент часу  $t = 0$ :

$$\begin{cases} u(x, y, z) = u_0; \\ p(x, y, z) = p_0, \end{cases} \quad (5)$$

де  $(x, y, z) \in \Omega$  – декартові координати, м;

$\Omega$  – розрахункова область.

Граничні умови для (1) включають:

– у вхідному перерізі каналів задаються нормальні компоненти швидкості або масові витрати матеріалу:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{inlet}(t); \quad \nabla G = G_{inlet}(t), \quad (6)$$

де  $\mathbf{n}$  – вектор зовнішньої нормалі до поверхні вхідного перерізу каналу;

$v_{inlet}$ ,  $G_{inlet}$  – швидкість (м/с) та масова витрата (кг/с) у вхідному перерізі каналу, відповідно;

$\nabla$  – логічне «або»;

– на поверхнях контакту рідини зі стінками каналу задаються умови прилипання:

$$\mathbf{v}_w = 0, \quad (7)$$

де  $\mathbf{v}_w$  – вектор результуючої швидкості на поверхні каналу у пристінному шарі, м/с.

**Числові дослідження процесу лиття виробу типу «лопатка».** За приклад деталі, отриманої методом лиття під тиском, було обрано виріб у формі лопатки, які застосовуються для випробувань на міцність (рис. 1). Деталь має дві точки впуску. Головною проблемою отримання виробів під час заливки з двох сторін є те, що такий виріб може містити дефект у вигляді лінії спаю (рис. 2), які утворилися при зустрічному русі потоків розплаву.

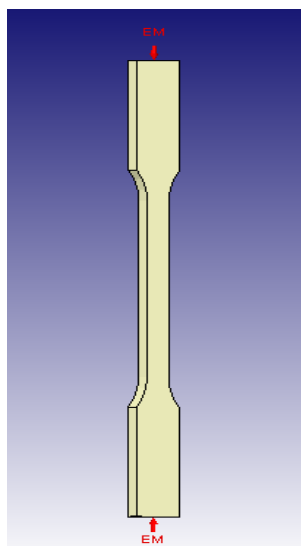
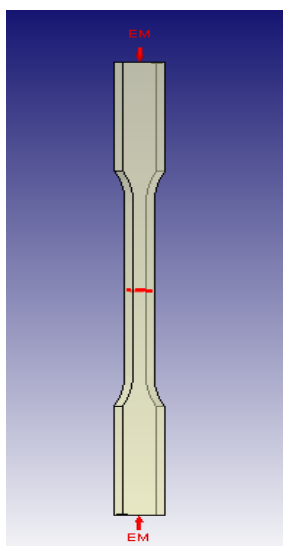
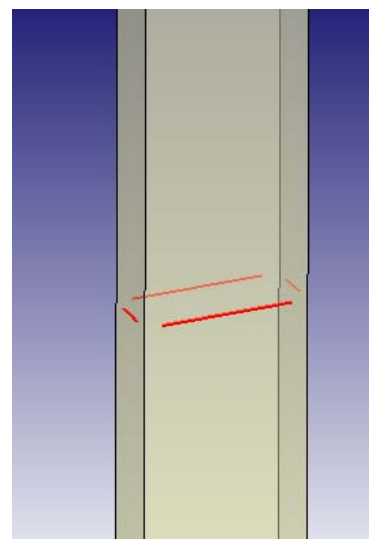


Рис. 1. Деталь типу «лопатка»



а)



б)

Рис. 2. Лінія спаю на деталі

Перероблюваним матеріалом вибрано композицію полівінілхлориду марки PVC CAE-PVC-001 CAE [4]. Для нього значення змінних із формули 1 прийнято такі:  $n = 0,142$ ;  $T = 473,3$  К;  $B = 0,3464$  кг/(м·с);  $T_b = 393$  К.

Початкові умови:

- витрата розплаву:  $V_0$ ;
- Температура розплаву на вході:  $T_0 = T_{розпл.}$

Граничні умови:

- Температура розплаву біля стінки дорівнює температурі форми:  $T = T_w$ ;
- прилипання на стінці:  $v_w = 0$ .

Для аналізу залежності лінії спаю від температури форми були проаналізовані числові дослідження таких параметрів, як кут зустрічі фронтів потоків (weld line meeting angle) (рис. 3) та температура фронтів потоків (weld line temperature) (рис. 4) при певних температурах форми, а саме 40–80 °С.

Кут зустрічі двох потоків розплаву, може становити від 0° до 135°, між двома збіжними фронтами розплаву. Причому за такої схеми течії найвища міцність у даній області буде спостерігатись за кута 180°, який відповідатиме суцільному матеріалу. Виходячи з графіка, можемо бачити, що кут спаю знаходиться в цих межах, максимального значення набуває при температурі 40°С, а мінімального при 55–65 °С.

Також були проведені аналогічні залежності, проте від температури розплаву (рис. 5, 6) при наступних температурах матеріалу, а саме 190, 200, 210, 220, 230 та 240°С.

Виходячи з графіка на рис. 5, можемо бачити, що кут спаю набуває мінімального значення при температурі розплаву 210 °С.

Проаналізувавши розрахунки, можемо зробити висновок, що підвищення температури на лінії спаю прямо пропорційне підвищенню температури розплаву. Лінія спаю при температурі розплаву 185 °С і нижче відсутня.

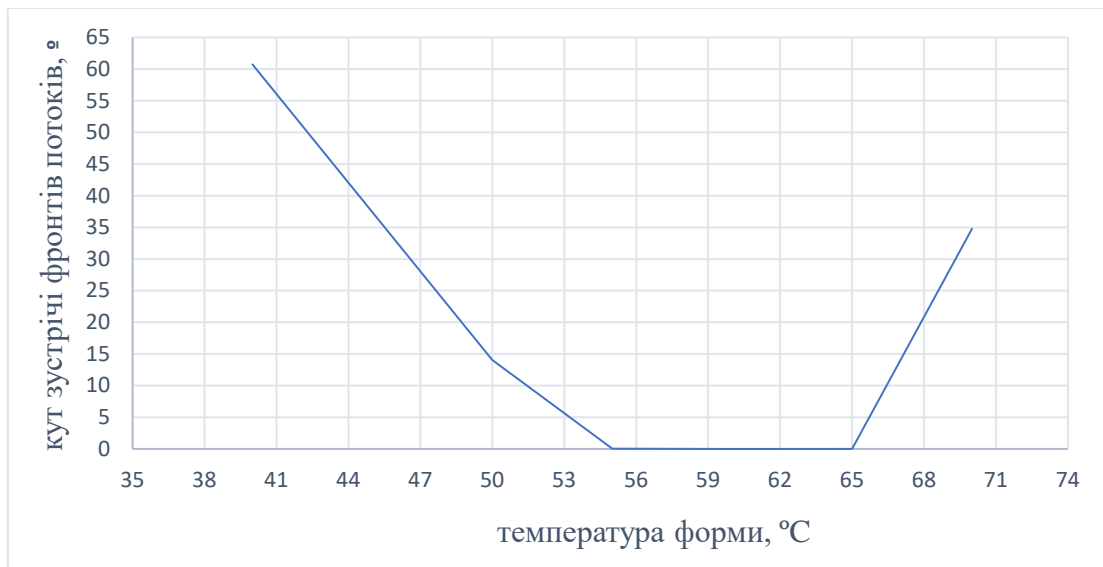


Рис. 3. Залежність кута спаю від температури форми

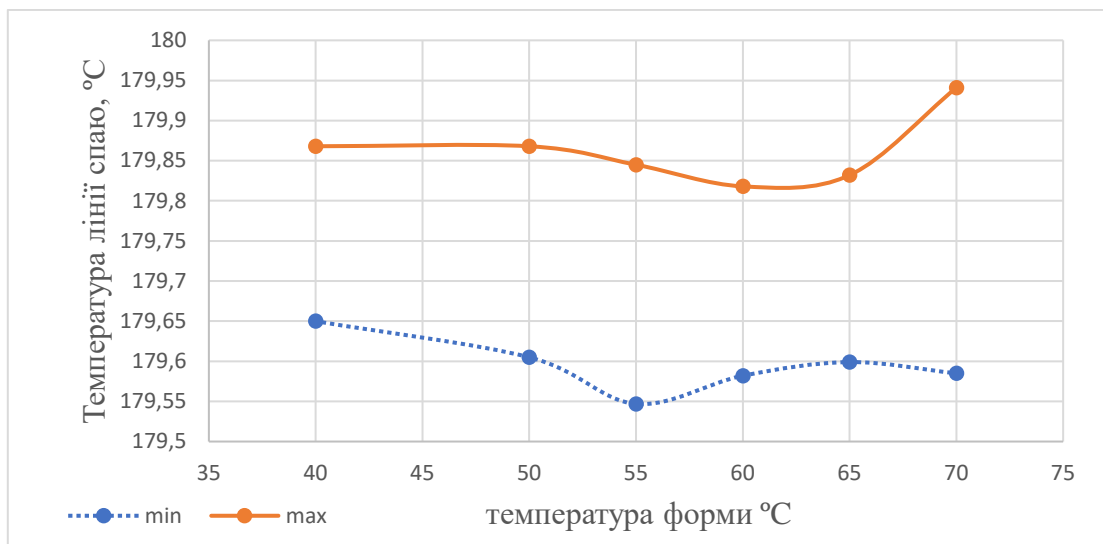


Рис. 4. Залежність температури лінії спаю від температури форми

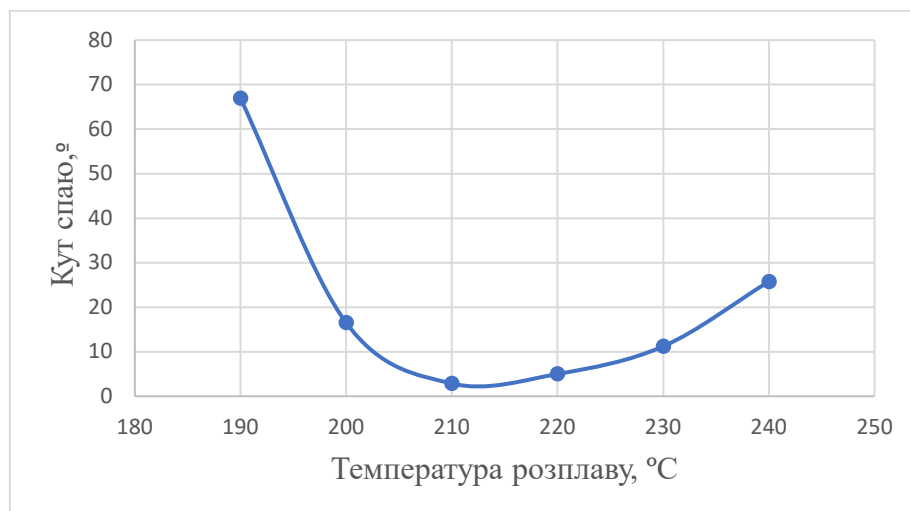


Рис. 5. Залежність кута спаю від температури розплаву

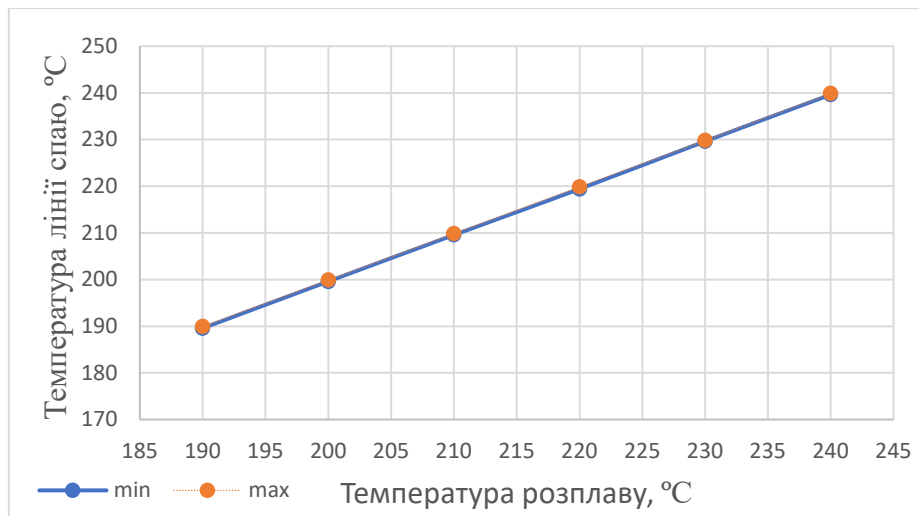


Рис.6. Залежність температури лінії спаю від температури розплаву

**Висновок.** Підтверджено вплив температури розплаву на лінію спаю. Таким чином, правильно підібрана температура форми та розплаву для даної деталі сприяє усуненню дефекту. Оптимальна температура розплаву для усунення лінії спаю є 180-185 °C (на графіку залежність вказана з 190 °C так як до даної температури лінія спаю відсутня), а температура форми 80 °C.

#### References

1. Adler, Yu. P. (1969). *Vvedeniye v planirovaniye eksperimenta* [Introduction to experiment planning]. Moscow: Metallurgy. 157 p. [in Russian].
2. Lapshin, V. V. (1974). *Osnovy pererabotki termoplastov lit'yem pod davleniyem* [Fundamentals of processing thermoplastics by molding under pressure]. Moscow: Chemistry. 270 p. [in Russian].
3. Kuznetsov, V. V., Ushakova, N. B., Polovinkina, T. P., Panichev, V. G. (1981). "Spai" pri lit'ye pod davleniyem izdeliy iz termoplastov. *Obzornaya informatsiya* ["Splits" for injection molding of products made of thermoplastics. Overview information]. Moscow: NIITEKHIM [in Russian].
4. Sokolsky, O. L., Gureva, A. O., Gureva, L. N. (2020). *Vplyv zony spaiu na mekhanichni vlastyvoli lytykh plastmasovykh vyrobiv* [The influence of the fusion zone on the mechanical properties of cast plastic products]. *Magyar Tudományos Journal* (Budapest, Hungary), № 40, P. 64–67 [in Ukrainian].
5. Selden, R. (1982). *Effect of Processing on Weld Line Strength in Five Thermoplastics*. Lubin George. Handbook of Composites. Swedish Institute for Iliber and Polymer Research. Springer US. 786 p. Doi: 10.1007/978-1-415-7139-1.
6. Zavgorodniy, V. K., Kalinchev, E. L., Maram, E. I. (1968). *Lityevyye mashyny dlya termoplastov i reaktoplastov* [Injection molding machines for thermoplastics and thermoplastics]. Moscow: Mashinostroenie. 374 p. [in Russian].

#### Література

1. Адлер Ю. П. *Введение в планирование эксперимента*. М.: Металлургия, 1969. 157 с.
2. Лапшин В. В. *Основы переработки термопластов литьем под давлением*. М.: Химия, 1974. 270 с.
3. Кузнецов В. В., Ушакова Н. Б., Половинкина Т. П., Паничев В. Г. "Спаи" при литье под давлением изделий из термопластов. *Обзорная информация*. Москва: НИИТЭХИМ, 1981.
4. Сокольський О. Л., Гур'єва А. О., Гур'єва Л. Н. Вплив зони спаю на механічні властивості литих пластмасових виробів. *Magyar Tudományos Journal* (Budapest, Hungary). 2020. № 40. P. 64–67.
5. Selden R. *Effect of Processing on Weld Line Strength in Five Thermoplastics*. Lubin George. Handbook of Composites. Swedish Institute for Iliber and Polymer Research. Springer US, 1982. 786 p. Doi: 10.1007/978-1-415-7139-1.
6. Завгородний В. К., Калинчев Э. Л., Марам Е. И. *Литьевые машины для термопластов и реактопластов*. М.: Машиностроение, 1968. 374 с.

7. Sokolsky, O. L., Simonchuk, E. P., Chemerys, A. O., Gureva, L. N. (2021). Modeliuvannia zony spaiu v lytykh polimernykh pakuvalnykh vyrobakh [Modeling of the fusion zone in molded polymer packaging products]. *Upakovka = Packaging*, No. 4 (143), P. 44–45 [in Ukrainian].
8. Malguarnera, S. C., Manisali, A. I., Riggs, D. C. (1981). Weld Line Structures and Properties in Injection Molded Polypropylene. *Polymer Engineering & Science*, Vol. 21, Issue 17, P. 1149–1155. Doi: 10.1002/pen.760211706.
9. Autodesk Moldflow tutorial files. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/>
10. Moldex3D Help 2020. URL: <https://www.moldex3d.com/en/moldex3d-help/>
7. Сокольський О. Л., Сімончук Є. П., Чемерис А. О., Гур'єва Л. Н. Моделювання зони спаю в литих полімерних пакувальних виробках. *Упаковка*. 2021. № 4 (143). С. 44–45.
8. Malguarnera S. C., Manisali A. I., Riggs D. C. Weld Line Structures and Properties in Injection Molded Polypropylene. *Polymer Engineering & Science*. 1981. Vol. 21, Issue 17. P. 1149–1155. Doi: 10.1002/pen.760211706.
9. Autodesk Moldflow tutorial files. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/>
10. Moldex3D Help 2020. URL: <https://www.moldex3d.com/en/moldex3d-help/>

**SIMONCHUK YELYZAVETA**

Graduent student, Department of Chemical, Polymer and Silicate Engineering of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine  
E-mail: elizabet96@ukr.net

**SOKOLSKYI OLEKSANDR**

Dr., Associate Professor, Department of Chemical, Polymer and Silicate Engineering of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-7929-3576>  
Scopus Author ID: 47861385600  
Researcher ID: J-9284-2017  
E-mail: sokolkiev@ukr.net

**СИМОНЧУК Е. П., СОКОЛЬСКИЙ А. Л.**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Украина

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЛИНИЙ СПАЯ**

**Цель.** Целью исследований является анализ критериев образования линий спаю и минимизация их образования посредством подбора таких параметров режима литья, как температура формы и температура расплава.

**Методика.** Для прогнозирования образования линий спаю при литье полимеров под давлением разработана компьютерная расчетная модель и определен диапазон температур расплава и формы при которых линия спаю для представленной детали будет отсутствовать. За один из критериев образования линий спаю предлагается взять угол встречи фронтов потоков расплава, другой критерий – температуру таких фронтов. В качестве примера детали, полученной методом литья под давлением, было выбрано изделие в форме лопатки, применяемые для испытаний на прочность. Перерабатываемым материалом выбрана композиция поливинилхлорида.

**Результаты.** Для анализа зависимости линии спаю от температуры формы были проанализированы числовые исследования таких параметров, как угол встречи фронтов потоков и температура фронтов потоков при определенных температурах формы. Подтверждено влияние температуры расплава на степень образования дефекта типа спаю. Правильно подобранная температура формы и расплава для полимерной детали, формируемая методом литья под давлением, способствует устранению дефекта. Угол спаю приобретает минимальное значение при температуре расплава 210 °С и температуре формы 55–65 °С. Повышение температуры на линии спаю прямо пропорционально повышению температуры расплава. Линия спаю при температуре расплава 185 °С и ниже отсутствует.



**Научная новизна.** Создана математическая модель неизотермического течения ламинарных потоков неньютоновской жидкости, описывающая процесс заполнения пресс-формы во время литья под давлением. Подтверждено влияние температуры расплава на параметры спая. Оптимальная температура расплава для устранения линии спая 180-185 °C, а температура формы 80 °C.

**Практическая значимость.** Числовое моделирование процесса образования линий спая позволяет подобрать температуру формы и расплава, за счет чего будет минимизирован дефект готовой детали.

**Ключевые слова:** литье; линия спая; математическая модель; числовое моделирование.

**SIMONCHUK Ye. P., SOKOLSKYI O. L.**

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

### **INVESTIGATION OF THE PROCESS OF FORMATION OF JOINT LINES**

**Purpose** The purpose of the research is to analyze the criteria for the formation of joint lines and minimize their formation by selecting such parameters of the casting mode as the temperature of the mold and the temperature of the melt.

**Method.** To predict the formation of joint lines during injection molding of polymers, a computer calculation model was developed and the range of melt temperatures and shapes at which the joint line for the presented part will be absent was determined. It is proposed to take the meeting angle of the fronts of melt flows as one of the criteria for the formation of fusion lines, and the temperature of such fronts as another criterion. As an example of a part obtained by the method of injection molding, a product in the form of a blade, which is used for strength tests, was chosen. Polyvinyl chloride composition was chosen as the recyclable material.

**The results.** To analyze the dependence of the joint line on the temperature of the mold, numerical studies of such parameters as the angle of the meeting of the flow fronts and the temperature of the flow fronts at certain mold temperatures were analyzed. The influence of the melt temperature on the degree of defect formation of the joint line type has been confirmed. Correctly selected mold and melt temperature for a polymer part formed by the injection molding method helps to eliminate the defect. The joint angle takes on a minimum value at a melt temperature of 210 °C and a mold temperature of 55–65 °C. The rise in temperature at the junction line is directly proportional to the rise in melt temperature. There is no melting line at a melt temperature of 185 °C and below.

**Scientific novelty.** A mathematical model of the non-isothermal flow of laminar flows of a non-Newtonian fluid was created, which describes the process of filling the mold during injection molding. The influence of the melt temperature on the parameters of the joint line has been confirmed. The optimal temperature of the melt to eliminate the fusion line is 180–185 °C, and the temperature of the mold is 80 °C.

**Practical significance.** Numerical modeling of the process of formation of joint lines allows you to choose the temperature of the mold and melt, due to which the defect of the finished part will be minimized.

**Key words:** casting; joint line; mathematical model; numerical simulation.