DOI 10.31891/2307-5732-2020-283-2-195-200
УДК 678.023.5

О.М. СИНЮК, О.А. КРАВЧУК, О.М. ЯШИНА, А.Ю. КРАВЧУК
Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАПОВНЕННЯ ПОРОЖНИНИ ПРЕС-ФОРМИ РОЗПЛАВОМ ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ З НАПОВНЮВАЧЕМ

В статті розроблено математичну модель руху суміші полімерного матеріалу з армуючими частинками у процесі заповнення порожнини прес-форми, яка, на відміну від наявних, дозволяє спостерігати за формуванням структури полімерного виробу із включеннями, що дає можливість конструювати і проектувати оснастку для лиття під тиском виробів легкої промисловості з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Ключові слова: *полімерний матеріал, технологічний процес.*

O. M. SYNYUK, O. A. KRAVCHUK, O. M. YASHYNA, A. Y. KRAVCHUK
Khmelnytskyi National University

MODELLING OF THE PRESS FORM FILLING OF MOLD WITH POLYMER MATERIAL WITH FILLER

Today, recycled polymer waste can be used in most light industry processes, including injection molding, compression molding, extrusion and calendering. The most acceptable technological processes are those having a wide range of technological parameters, that is, those that do not require narrow specification. Therefore, it is desirable to use recycled polymeric material in the manufacture of new light industry products which are obtained by injection molding or extrusion. Other methods of forming polymeric products of light industry can be applied only in cases where the secondary polymer has properties close to the original. The most promising technology for producing polymer products using a significant proportion of recycled polymeric waste today is injection molding of polymer products with the introduction of secondary polymers as a binder. Understanding the processes that occur when forming the structure of a material with a filler, will allow you to design and design injection molding to obtain polymer products of light industry with high performance properties. In order to do this, the filling of the mold cavity with polymeric material with the inclusion of recycled waste particles should be modeled first. The article develops a mathematical model of the motion of a mixture of polymeric material with reinforcing particles in the process of filling the mold cavity, which, unlike the available ones, allows to observe the formation of the structure of the polymeric product with inclusions, which makes it possible to design and design injection molding for obtaining light industry products with high performance.

Keywords: *polymer material, technological process.*

Вступ

Сьогодні перероблені полімерні відходи можна використовувати в більшості технологічних процесів легкої промисловості, включаючи лиття під тиском, компресійне пресування, екструзію та каландрування. Найбільш прийнятними технологічним процесами є ті, що мають широкий діапазон технологічних параметрів, тобто такі, у яких не потрібне влучання у вузькі рамки специфікацій. Тому вторинно перероблений полімерний матеріал бажано використовувати під час виробництва нових товарів легкої промисловості, які отримують литтям під тиском або екструзією. Інші способи формування полімерних виробів легкої промисловості можна застосовувати тільки в тих випадках, коли вторинний полімер має властивості, близькі до оригінального [1]. Найбільш перспективною на сьогодні технологією отримання полімерних виробів із використанням значної частки перероблених полімерних відходів є лиття під тиском полімерних виробів при введенні в них вторинних полімерів як з'єднувального матеріалу.

Полімерні вироби, що армуються подрібненим полімерним матеріалом, мають підвищені фізико-механічні характеристики [2], тому що основні напруження від впливу зовнішніх навантажень сприймаються саме полімерним наповнювачем і найбільша жорсткість та міцність виробу забезпечуються вздовж напрямку орієнтації частинок наповнювача.

Розраховане та спроектоване обладнання для переробки полімерних відходів дозволяє отримувати частинки, які можна використовувати як наповнювач під час виробництва нових полімерних виробів легкої промисловості, тим більше, що частинки перероблених полімерних відходів володіють анізотропією фізико-механічних властивостей, тобто мають властивості, подібні до армувальних волокон.

Для виробництва полімерних виробів легкої промисловості (деталей низу взуття, корпусів валіз та інших виробів) із використанням перероблених полімерних відходів необхідно розробити ливарне обладнання, яке дозволить використовувати перероблений полімер як наповнювач або сполучний елемент.

Для армованих виробів можна визначити домінантний фактор, що впливає на експлуатаційні властивості виробів, – це орієнтація частинок наповнювача. Всі інші параметри, такі як зміна тиску і температури, і навіть кристалізація, мають другорядне значення. Таким чином, відомі принципи конструювання прес-форм для лиття під тиском для мінімізації дефектів мають обмежену значимість, у той же час на передній план виходять зовсім інші залежності.

Оскільки під час заповнення прес-форми полімерним матеріалом частинки наповнювача будуть мати певну орієнтацію, то властивості матеріалу, що переробляється, будуть мати анізотропний характер. У результаті використання наповнювачів з'являється локально різний розподіл жорсткості і усадки, що залежить від орієнтації частинок наповнювача за площею поверхні і товщиною стінок виробу.

Розуміння процесів, що відбуваються під час формування структури матеріалу із наповнювачем,

дозволить конструювати і проектувати оснастку для лиття під тиском полімерних виробів легкої промисловості з підвищеними експлуатаційними властивостями [3]. Для цього, передусім, слід змоделювати заповнення порожнини прес-форми полімерним матеріалом із включенням частинок перероблених відходів.

Виклад основного матеріалу

Математична модель руху розплаву полімеру в порожнині прес-форми. Течія в'язкої рідини підпорядковується закону Ньютона про лінійний зв'язок між тензорами напружень і тензорами швидкостей, який з необхідною для нашої задачі точністю описується рівняннями Нав'є-Стокса [4, 5]:

$$\frac{\partial \overline{\mathbf{V}}}{\partial t}+\left(\overline{\mathbf{V}}\cdot\nabla\right)\overline{\mathbf{V}}=\overline{\mathbf{F}}-\frac{1}{\rho}\operatorname{grad}P+\nu\cdot\nabla^2\overline{\mathbf{V}} \tag{1}$$

де $\overline{\mathbf{V}}$ – вектор швидкості в окремій точці полімерного середовища, м/с; $\overline{\mathbf{F}}$ – головний вектор об'ємних сил, Н; ν – кінематична в'язкість полімеру, м^2/с; P – тиск в окремій точці розплаву полімеру, Па; ρ – густина полімерного середовища, кг/м^3.

Тиск P визначається з урахуванням припущення про те, що в будь-якій точці ньютонівської в'язкої рідини тиск дорівнює середньому арифметичному трьох нормальних напружень, що прикладені до взаємно перпендикулярних площадок у певній точці середовища, взятій зі зворотнім знаком:

$$-\left(\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z\right)/3=P, \tag{2}$$

де $\sigma_x,\sigma_y,\sigma_z$ – нормальні напруження, що прикладені до взаємно перпендикулярних площадок у певній точці середовища.

Оскільки в роботі розглянуто стаціонарне поле густини, тобто $\partial\rho/\partial t=0$, то рівняння неперервності [6, 7] приймає вигляд:

$$\operatorname{div}\left(\rho\cdot\overline{\mathbf{V}}\right)=0\ . \tag{3}$$

Припущення щодо стаціонарності поля густини базується на тому, що полімерне середовище майже не стискається, тобто міжмолекулярні відстані не змінюються. Якщо рух полімерного середовища в прес-формі здійснюється з порівняно невеликою швидкістю, то можна припустити, що густина постійна в кожній точці розплаву полімеру, а це дозволяє отримати рівняння нестисливості для в'язкого середовища:

$$\operatorname{div}\left(\overline{\mathbf{V}}\right)=0. \tag{4}$$

Запишемо рівняння руху (1) для розплаву полімеру в декартових координатах (в проекціях x та y):

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+\upsilon\frac{\partial u}{\partial y}&=F_x-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\nu\cdot\nabla^2u,\\ \frac{\partial \upsilon}{\partial t}+u\frac{\partial \upsilon}{\partial x}+\upsilon\frac{\partial \upsilon}{\partial y}&=F_y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+\nu\cdot\nabla^2\upsilon,\end{aligned}\ . \tag{5}$$

де u, υ – проекції вектора швидкості на осях x і y; F_x, F_y – проекції головного вектора об'ємних сил на осях x і y; t – час; ν – кінематична в'язкість розплаву полімеру, що дорівнює відношенню динамічної в'язкості μ до постійної густини ρ.

Запишемо умову нестисливості розплаву полімеру в декартових координатах (в проекціях x та y):

$$\partial u/\partial x+\partial \upsilon/\partial y=0\cdot \tag{6}$$

Проекції головного вектора об'ємних сил можна визначити за другим законом Ньютона:

$$F_{\text{x}}=\rho\cdot S\cdot h\cdot\frac{\partial \upsilon_x}{\partial t},\quad F_{\text{y}}=\rho\cdot S\cdot h\cdot\frac{\partial \upsilon_y}{\partial t}, \tag{7}$$

де S – площа вздовж осьового перерізу порожнини прес-форми для лиття полімерних виробів легкої промисловості, м^2; h – висота прес-форми, м^2.

Через те, що на цьому етапі розглядається плоска задача, тобто рух розплаву полімеру відбувається в площині осьового перерізу порожнини прес-форми, висота h та, відповідно, проекції головного вектора об'ємних сил F_x, F_y дорівнюють нулю. З урахуванням цього та умови нестисливості (6), система рівнянь руху розплаву полімеру в порожнині прес-форми (5) запишеться таким чином:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+\upsilon\frac{\partial u}{\partial y}&=-\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\cdot\left[\frac{\partial^2u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2u}{\partial y^2}\right],\\ \frac{\partial \upsilon}{\partial t}+u\frac{\partial \upsilon}{\partial x}+\upsilon\frac{\partial \upsilon}{\partial y}&=-\frac{\partial p}{\partial y}+\nu\cdot\left[\frac{\partial^2\upsilon}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\upsilon}{\partial y^2}\right],\end{aligned} \tag{8}$$

де p – відношення тиску P до постійної густини ρ (надалі просто "тиск").

Для визначення тиску скористаємося рівнянням Пуассона:

$$\nabla^2p=\frac{\partial^2p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2p}{\partial y^2}=-\frac{\partial D}{\partial t}-u\frac{\partial D}{\partial x}-\upsilon\frac{\partial D}{\partial y}+\nu\cdot\nabla^2D, \tag{9}$$

де D – дивергенція вектора швидкості, яка визначається таким співвідношенням:

$$D = \partial u / \partial x + \partial \upsilon / \partial y . \quad (10)$$

Отже, система рівнянь (8) та рівняння (9) є основними для визначення полів швидкості та тиску. Якщо врахувати припущення, що потік в'язкої рідини є нестисливим, тобто врахувати умову (6), то рівняння (9) перетвориться на рівняння Лапласа для тиску: p

$$\nabla^2 p = 0. \quad (11)$$

Додамо до них граничні умови на осі симетрії, на границі входження в канал, на твердих поверхнях порожнини прес-форми, на вільній поверхні полімерного розплаву (рис. 1).

1. Граничні умови на осі симетрії. Відповідно до [4, 7], будемо вважати, що на осі симетрії радіальна швидкість υ і тангенціальне напруження τ дорівнюють нулю.

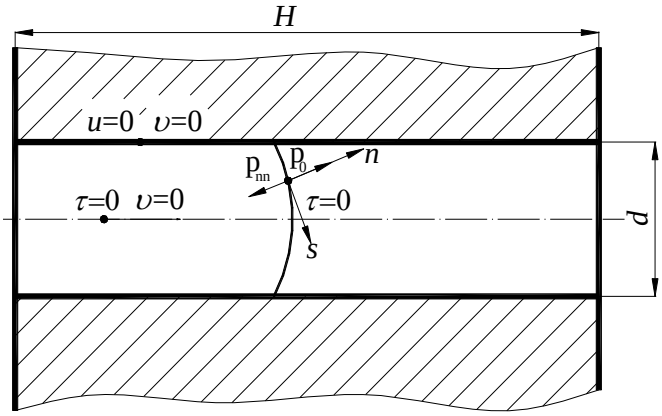

Рис. 1. Граничні умови для моделі заповнення порожнини прес-форми полімерним розплавом

Граничні умови біля твердих стінок. Відповідно до [7], приймемо, що в точках, де розплав полімеру дотикається до твердої нерухомої стінки, швидкість його прямує до нуля, тобто в точках дотику полімерного розплаву з твердою нерухомою стінкою нормальна і дотична складові швидкості дорівнюють нулю: $u = 0$, $\upsilon = 0$ (рис. 1). Граничні умови для тиску біля твердих стінок і на осі симетрії невідомі, їх можна знайти з системи рівнянь (8) підставлянням в них граничних швидкостей.

3. Граничні умови на границі втікання. Відповідно до [6], тут задається один із компонентів вектора швидкості. Початковими умовами задачі є значення швидкостей і тиску в початковий момент часу.

4. Граничні умови на вільній поверхні. На вільній поверхні, де передбачається, що полімерний розплав витікає з області, що розглядається, ставляться так звані "м'які" граничні умови, або умови "зносу". Тут передбачається рівність нулю нормальних похідних тиску і компонент швидкості:

$$\partial p_n / \partial x = 0, \qquad \partial u / \partial x = 0, \qquad \partial \upsilon / \partial x = 0 \quad (12)$$

У цій роботі розглядаються порівняно повільні рухи в'язких рідин, а відповідно до теорії в'язкого середовища [4] і враховуючи повільний рух щільного розплаву полімеру, рівняння (8) можна записати таким чином:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \nu \cdot \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial u}{\partial t}, \qquad \frac{\partial p}{\partial y} = \nu \cdot \left[\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial \upsilon}{\partial t}. \quad (13)$$

Якщо використати гіпотезу квазістаціонарності [7], тобто весь процес руху полімерного розплаву розбити на кінцеву кількість стаціонарних задач, то систему рівнянь (13) можна представити таким чином:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \nu \cdot \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right], \qquad \frac{\partial p}{\partial y} = \nu \cdot \left[\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial y^2} \right]. \quad (14)$$

Розв'язувати рівняння (11) та систему рівнянь (14) із заданими граничними умовами будемо за допомогою скінченно-різницевого методу маркерів і комірок [8].

Метод маркерів і комірок являє собою числовий підхід до розрахунку динаміки неусталених течій в'язкого нестисливого середовища. У ньому використовується скінченно-різницева схема для розв'язання рівняння нерозривності та рівнянь руху суцільного середовища [4, 7]. Цим методом можна розраховувати задачі руху в'язкого полімерного розплаву, при цьому положення полімерного матеріалу відзначається маркерами. Такі маркери переміщуються разом із матеріалом по ейлеревій розрахунковій сітці.

У методі маркерів і комірок усі диференціальні рівняння та граничні умови записуються у скінченних різницях на сітці фіксованих комірок, що покриває область течії полімерного розплаву. Час також розбивається на скінченне число інтервалів. В об'єм полімеру та на його поверхню наноситься система маркерів, що безпосередньо зв'язані з полімерним матеріалом. Ці маркери можуть переміщуватися по ейлеревій сітці з локальною швидкістю полімеру, показуючи його положення у певний момент часу

відповідно до рівняння Лагранжа:

$$dx/dt = u, \qquad dy/dt = \upsilon. \tag{15}$$

У такий спосіб маркери вводяться тільки для візуалізації плину розплаву полімеру. Вони показують, які комірки містять полімерний матеріал (заповнені комірки), які не містять (порожні комірки). Їхня основна задача – візуалізація потоку полімерного розплаву. Типова комірка представлена на рис. 2.

Для протікання розплаву полімеру через цю комірку повинна виконуватися умова нестисливості, тобто відстань між маркерами, що знаходяться в межах елементарної комірки, не повинна змінюватися в процесі течії.

У кожній комірці визначаються три незалежні змінні u, υ та p і кожна з них центрується в окремих точках сітки. Тиск p та дивергенція D задаються в центрі i, j кожної комірки.

Горизонтальна складова швидкості $u_{i+1/2,\,j}$ визначається тільки на вертикальних границях комірок ($x_{i+1/2}, y_j$) і, аналогічно, вертикальна складова швидкості $\upsilon_{i,\,j+1/2}$ визначається тільки на горизонтальних границях комірок $\left(x_i, y_{j+1/2}\right)$. Надалі, щоб уникнути напівцілих індексів, швидкості $u_{i+1/2,\,j}$ і $\upsilon_{i,\,j+1/2}$ будемо позначати $u_{i,\,j}$ і $\upsilon_{i,\,j}$, тобто віднесемо індексацію швидкостей до центра, пам'ятаючи, що вони центровані на серединах сторін комірки.

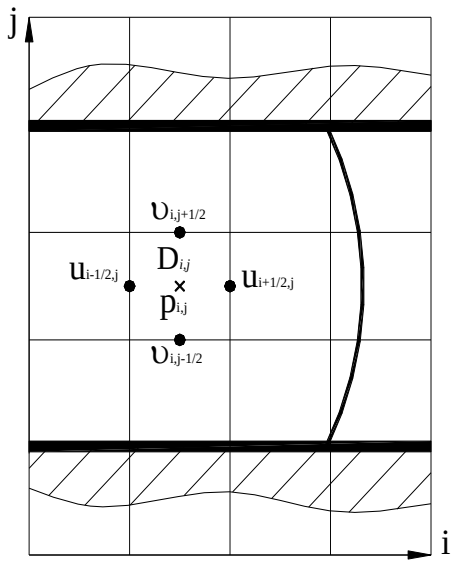

Рис. 2. Розрахункова схема

Як зазначалося раніше, граничні умови біля твердих стінок містять нормальні похідні тиску. Для їх задоволення необхідно ввести фіктивні комірки, які розташовані за межами фізичної твердої границі [5].

По ейлеревій сітці розподіляються маркери, що рухаються з локальними швидкостями. У результаті конфігурація в'язкої рідини визначається розподілом маркерів по ейлеревій сітці, яка складається з чотирьох типів комірок [7]:

- граничні комірки, в яких виконуються умови біля твердих стінок, границь втікання, осі симетрії;
- повні комірки, які містять маркери та оточені іншими повними комірками;
- порожні комірки, які не містять маркерів;
- поверхневі комірки, які містять маркери, але межують із порожніми комірками.

Використовуючи [4, 6], запишемо диференціальні рівняння руху (14), що описують плин розплаву полімеру, у скінченно різницевій формі, замінюючи диференціальні операторів їх різницевими аналогами:

$$\frac{p_{i,j} - p_{i+1,j}}{h} + \nu \cdot \left[\frac{u_{i+1,j} - 2 \cdot u_{i,j} + u_{i-1,j}}{h^2} + \frac{u_{i,j+1} - 2 \cdot u_{i,j} + u_{i,j-1}}{h^2} \right] = 0, \tag{16}$$

$$\frac{p_{i,j} - p_{i,j+1}}{h} + \nu \cdot \left[\frac{\upsilon_{i+1,j} - 2 \cdot \upsilon_{i,j} + \upsilon_{i-1,j}}{h^2} + \frac{\upsilon_{i,j+1} - 2 \cdot \upsilon_{i,j} + \upsilon_{i,j-1}}{h^2} \right] = 0. \tag{17}$$

Скінченно-різницевий аналог рівняння нерозривності (6) запишемо у вигляді:

$$D_{i,j} = \frac{1}{h} \cdot \left(u_{i,j} - u_{i-1,j} + \upsilon_{i,j} - \upsilon_{i,j-1} \right) = 0. \tag{18}$$

Поле тиску відповідно до рівняння (11) в різницевій формі запишеться так:

$$\frac{p_{i+1,j} - 2 \cdot p_{i,j} + p_{i-1,j}}{h^2} + \frac{p_{i,j+1} - 2 \cdot p_{i,j} + p_{i,j-1}}{h^2} = 0. \tag{19}$$

Аналогічно у формі скінчених різниць запишемо граничні умови для комірок біля твердих стінок, на границі втікання, на осі симетрії та на вільній поверхні, що межує з повітрям [5].

Наведені вище вирази утворюють повну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення всіх невідомих у різних типах комірок – граничних, повних та поверхневих. Для розв'язання згаданих систем рівнянь доцільно використовувати ітераційні методи, що враховують спеціальний вигляд таких систем і є зручними для реалізації на ЕОМ [4].

В роботі використано ітераційний метод Лібмана [7], з проведенням послідовних релаксацій:

$$x^k = x^{k-1} + \omega \cdot (\mathbf{f} - \mathbf{A} \cdot x^{k-1}), \tag{20}$$

де ω – релаксаційний параметр, який приймає значення від 0 до 2. При $\omega > 1$ процес називають

“верхньою” релаксацією, при $\omega < 1$ процес називають “нижньою” релаксацією.

Результати спостережень за процесами, що відбуваються під час формування структури матеріалу із наповнювачем, дають можливість конструювати і проектувати оснастку для лиття під тиском полімерних виробів легкої промисловості з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Моделювання заповнення порожнини прес-форми розплавом полімеру із включеннями. Під час впорскування розплаву полімеру через впускний ливник у порожнину прес-форми, він починає розподілятися в радіальному напрямку [7]. Оскільки периметр фронту течії збільшується, то розплав піддається еластичному розширенню під прямим кутом до напрямку течії. У той час як порожнина прес-форми заповнюється розплавом, у напрямку її ширини встановлюється профіль потоку (рис. 3). Найбільша швидкість розплаву полімеру в середині потоку, а по краях вона зменшується аж до нуля через адгезію з холодними стінками прес-форми. Внаслідок цього розплав піддається зусиллям зсуву, які й створюють опір течії і тим самим тиск лиття.

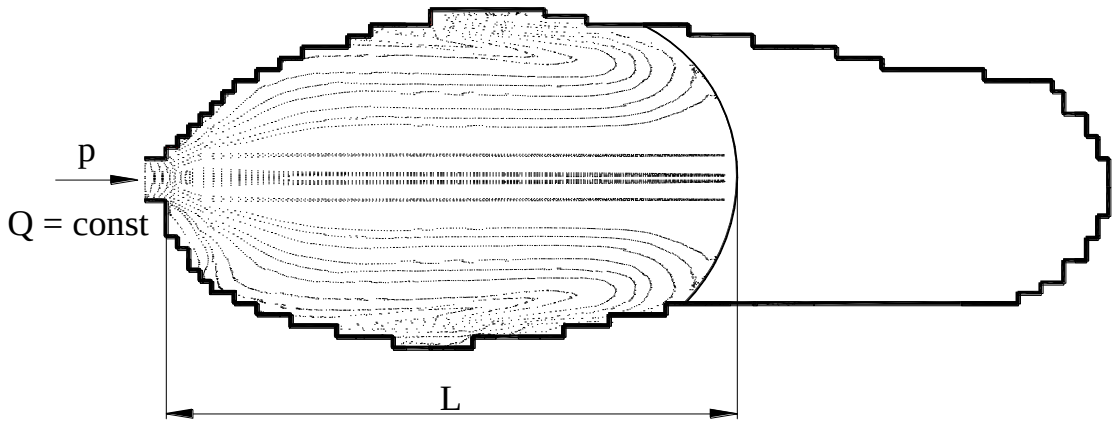

Рис. 3. Моделювання заповнення розплавом полімеру порожнини прес-форми для лиття підошов

Зсув матеріалу, проте, не є однорідним відносно товщини стінки. Більше того, поблизу стінки існує яскраво виражений зсувний шар, у той час як у центрі розплав тече швидше і майже не схильний до зсуву. Частина розплаву, яка дуже швидко тече вперед у середньому шарі, врешті-решт, направляється “фонтаноподібним” фронтом течії у безпосередню близькість до стінки прес-форми і тим самим підпадає під вплив напружень зсуву. Початкова орієнтація частинок наповнювача не впливає на їх кінцеву орієнтацію.

Таким чином, орієнтація включень формується у результаті розширення потоку розплаву полімеру, “фонтаноподібної” течії фронту розплаву та під впливом напружень зсуву (рис. 4).

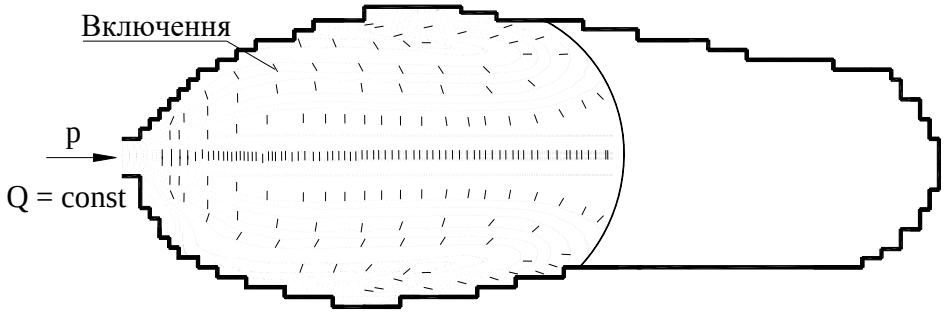

Рис. 4. Моделювання заповнення порожнини прес-форми розплавом полімеру із наповнювачем

Як видно з рис. 4, у порожнині прес-форми процеси формування орієнтації частинок наповнювача накладаються один на одного. Розплав разом із включеннями, потрапляючи через впускний ливник у порожнину, отримує спочатку яскраво виражену поперечну орієнтацію, потім він разом із потоком у центрі порожнини переміщується в напрямку фронту розплаву, не відчуваючи при цьому практично ніякої зміни орієнтації, тобто включення, як і раніше, орієнтовані поперек напрямку потоку [9]. На фронті розплаву розплав із включеннями перенаправляється до стінок прес-форми і внаслідок цього потрапляє у зсувний потік, який переорієнтовує включення. Таким чином, внаслідок обох процесів у полімерному виробі виникають два шари, в кожному з яких основний напрямок частинок повернутий на 90 ° відносно іншого шару.

Механічні властивості виробу будуть залежати від товщини цих шарів і від відповідного кута орієнтації включень. У тих місцях, де переважають периферійні шари, орієнтація включень спрямована вздовж течії, а ближче до центру потоку розплаву кут орієнтації включень збільшується до 90 °. Таким

чином, біля стінок прес-форми формується такий шар полімеру, в якому частинки наповнювача орієнтовані вздовж течії розплаву полімеру, що перешкоджає утворенню усадки в напрямку течії.

Висновки

Розроблено математичну модель руху суміші полімерного матеріалу з армуючими частинками у процесі заповнення порожнини прес-форми, яка, на відміну від наявних, дозволяє спостерігати за формуванням структури полімерного виробу із включеннями, що дає можливість конструювати і проектувати оснастку для лиття під тиском виробів легкої промисловості з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Література

1. Мантия Ф. Ла. Вторичная переработка пластмасс / Франческо ла Мантия ; [под. ред. Г.Е. Зайкова ; пер. с англ.]. – СПб : Профессия, 2006. – 400 с.

2. Карван С.А. Розробка захисного форменого одягу для військовослужбовців / С.А. Карван, С.Л. Горященко, О.М. Синюк // Тези доповідей V міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки" (11-12 жовтня 2017). – Київ, 2017. − С. 145–147.

3. Злотенко Б. М. Научные основы проектирования технологического процесса литья изделий лёгкой промышленности с прогнозированными свойствами : дис. … доктора техн. наук : 05.19.06 / Злотенко Борис Миколайович. – К., 2003. – 405 с.

4. Synyuk O. Improvement of Footwear Moulding Machines for the Production of the Advanced Reliability Items / O. Synyuk, M. Skyba // The eleventh world congress in Mechanism and Machine Science (1–4 April 2004). − Tianjin (China) : Editor Tian Huang School of Mechanical Engineering Tianjin University, 2004. − V. 5. − P. 2212–2216.

5. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості : монографія / [О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, В.П. Коновал, І.В. Панасюк, М.Є. Скиба, О.М. Синюк]. – Хмельницький : РВЦ ХНУ, 2007. − 255 с.

6. Kulik T. Modeling a process of filling the mold during injection molding of polymeric parts / T. Kulik, O. Synyuk , B. Zlotenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 5/1 (89). – P. 70–77.

7. Skyba M. Improvement of press-forms for polymeric items moulding / M. Skyba, O. Synyuk // Archives of foundry. Polish Academy of Sciences branch Katowice foundry commission, Katowice (Poland), 2004. − V. 4. − № 12. − P. 235–248.

8. Brazel Christopher S. Fundamental principles of polymeric materials / Christopher S. Brazel, Stephen L. Rosen. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2012. – 407 p.

9. Синюк О.М. Моделювання процесу заповнення розплавом полімеру порожнини прес-форми з армуючими елементами / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2017. − № 1 (245). − С. 251–257.

References

1. Francesco La Mantle Recycling of plastics / ed. G.E. Zaykova. – St. Petersburg : Profession, 2006. – 400 p.

2. Karvan S.A. Development of protective uniforms for servicemen / S.A. Karvan, S.L. Goryashchenko, O.M. Synyuk // Abstracts of the 5th international scientific-practical conference "Problems of coordination of military-technical and defense-industrial policy in Ukraine. Prospects for the development of weapons and military equipment" (October 11-12, 2017). – Kyiv, 2017. – P. 145–147.

3. Zlotenko B.M. Scientific bases of designing of technological process of casting of light industry products with predicted properties: dissertation of Doctor of Engineering Sciences: 05.19.06 / Zlotenko Borys Mykolaiovych. – K., 2003. – 405 p.

4. Synyuk O. Improvement of Footwear Molding Machines for the Production of Advanced Reliability Items / O. Synyuk, M. Skyba // The Eleventh World Congress in Mechanism and Machine Science (1–4 April 2004). – Tianjin (China): Editor, Tian Huang School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2004. – V. 5. – P. 2212–2216.

5. Burmistenkov O.P. Production of molded parts and articles made of polymeric materials in the shoe and leather goods industry: monograph / O.P. Burmistenkov, B.M. Zlotenko, V.P. Konoval, I.V. Panasyuk, M.E. Skyba, O.M. Synyuk. – Khmelnytskyi: RVC KhNU, 2007. – 255 p.

6. Kulik T. Modelling a molding process during injection molding of polymeric parts / T. Kulik, O. Synyuk, B. Zlotenko // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – No. 5/1 (89). P. 70–77.

7. Skyba M. Improvement of press molds for polymeric molding items / M. Skyba, O. Synyuk // Archives of foundry. Katowice Foundry Commission, Katowice (Poland), 2004. – V. 4. – № 12. – P. 235–248.

8. Christopher S. Brazel Fundamental Principles of Polymeric Materials / Christopher S. Brazel, Stephen L. Rosen. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. – 407 p.

9. Synyuk O.M. Simulation of the melt filling process of a mold cavity with reinforcing elements / O.M. Synyuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – Issue 1 (245). – P. 251–257.

Рецензія/Peer review : 6.4.2020 р. Надрукована/Printed : 17.6.2020 р.
Стаття рецензована редакційною колегією