

---

## ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ, ТА КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407/plit2021.03.053>

УДК 621.74.046:004.942

**І. А. Шалевська**, д-р техн. наук, заст. зав. відділу;

e-mail: [innashalevska@gmail.com](mailto:innashalevska@gmail.com);

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8410-7045>

**П. Б. Калюжний**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;

e-mail: [kpb.ptima@gmail.com](mailto:kpb.ptima@gmail.com) ; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-1111-4826>

**Є. В. Погребач**, аспірант; e-mail: [x1an@ukr.net](mailto:x1an@ukr.net) ; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7190-2691>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

### ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЕФЕКТІВ, ЩО УТВОРЮЮТЬСЯ У СТАЛЕВИХ ВИЛИВКАХ КОРПУСІВ ЗАПІРНОЇ АРМАТУРИ ПРИ ЛИТТІ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ

Представлено результати комп'ютерного моделювання технологічного процесу виготовлення сталевих виливків «корпус вентилів DN80 PN40» методом лиття за моделями, що газифікуються. Моделювання проведено з використанням програми Flow-3D Cast для визначення дефектів, які можуть утворитися у виливках при термодеструкції пінополістиролової моделі. Проаналізовано можливості програмного продукту Flow-3D Cast щодо адекватності результатів моделювання та їх відповідності натурним випробуванням. Встановлено, що в основу розрахунку програми покладено оцінку середньої швидкості фронту металу через коефіцієнт теплопередачі між металом та пінополістиролом, при цьому піномодель описується як постійна температурна перешкода. Визначено, що алгоритм прогнозування поверхневих дефектів у Flow-3D Cast складається з вихідних величин утворення оксиду, що пропорційний площі поверхні та часу взаємодії, при цьому модель не враховує такі явища, як оксидна плівка, що прилипає до стінок форми і залишки піномоделі, що виходять через пористу піщану форму. Досліджено механізм формування поверхневих дефектів та пояснено за допомогою фізичної моделі взаємодії рідкого металу з пінополістиролом. Наведено результати моделювання процесів лиття виливків «корпус вентилів DN80 PN40» за допомогою Flow-3D Cast з двома варіантами ливниково-живильної системи, досліджено кінетику заповнення ливарної форми за наявності пінополістиролової моделі та ймовірність утворення поверхневих дефектів у виливках. Визначено оптимальний варіант ливниково-живильної системи, а саме метал до виливків має підводитися знизу за допомогою трьох живильників – у фланці та середню частину корпусу, який виключає утворення «застійних зон» у місцях зустрічі потоків розплаву. Перевірено, що система комп'ютерного моделювання Flow-3D Cast дозволяє ідентифікувати місця утворення складчатості та інших дефектів, пов'язаних із захопленням пінополістиролу чи продуктів його розкладу.

**Ключові слова:** лиття за моделями, що газифікуються, пінополістиролові моделі, комп'ютерне моделювання, формування дефектів виливків, ливниково-живильна система.

Дедалі більшого поширення в Україні та світі набуває спосіб лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), який використовується для виробництва широкої номенклатури виливків, включаючи особливо відповідальні деталі, в число яких входять трубопровідна арматура. ЛГМ дозволяє одержувати сталеві арматурні виливки високої якості з необхідним рівнем властивостей [1]. Однак отримання придатних якісних виливків є можливим лише в разі правильно спроектованої ливниково-живильної системи (ЛЖС). Ливниково-живильна система значно впливає на процес заливання форми сплавом, під час якого відбувається газифікація пінополістиролової моделі та заміщення її сплавом. Неправильна конструкція ливникової системи може призвести до замішування пінополістиролу і газів, які утворюються від його розкладання, в рідкий метал, що згодом викликає утворення різних дефектів в тілі та на поверхні вилівка.

Ефективним помічником на етапі розробки ливниково-живильної системи є системи комп'ютерного моделювання ливарних процесів (СКМЛП), оскільки дозволяють у короткий термін оцінити різні варіанти технології без застосування дорогих промислових експериментів, витрат енергії та матеріалів. Комп'ютерне моделювання стало потужним інструментом для візуалізації процесів заповнення форми, затвердіння і охолодження вилівка, а також для прогнозування розташування внутрішніх дефектів, таких, як усадочні раковини і пористість, неметалеві включення, гарячі і холодні тріщини. СКМЛП використовують як для коригування існуючих технологічних процесів [2], так і для розробки нових [3, 4]. Наразі СКМЛП дозволяють моделювати не тільки гравітаційне лиття в піщані форми, а й спеціальні способи лиття. Однак не всі існуючі програми можуть моделювати ЛГМ, а моделювання заливки без урахування пінополістиролової моделі дає неправильні результати. Станом на сьогодні процес ЛГМ дозволяють змоделювати програми ProCast, Flow-3D Cast, Magmasoft [5].

Для перевірки ливникової системи вилівка, що виготовляється за моделями, що газифікуються, нами спільно з індійськими колегами використано СКМЛП Flow-3D Cast. Дане програмне забезпечення дозволяє моделювати наступні процеси: теплові, усадкові, гідродинамічні, термомеханічні, формування дефектів; та відображати результати у вигляді полів: температури, усадки, поруватості, швидкостей потоку, захоплення повітря, термічних напруг, різних дефектів.

Відомо, що адекватність результатів моделювання того чи іншого софту та їх відповідність натурним випробуванням визначається, в першу чергу, фізичними та математичними моделями, які покладено в основу розрахунку програми. Відмінною особливістю ЛГМ від традиційної технології лиття у порожнисті піщані форми є наявність разової піномоделі, зазвичай, полістиролової. Під час заливання рідкий метал повинен газифікувати піномодель, перш ніж він зможе заповнити порожнину. Зважаючи на це, процес заливання переважно визначається теплообміном між металом та пінополістироловою моделлю. Завдання ж моделювання процесу ЛГМ полягає в точному описі динаміки межі розділу метал–модель, включаючи виділення рідких та газоподібних продуктів розкладання піномоделі [6].

Flow-3D Cast описує піномодель як постійну температурну перешкоду, яка може мати просторово змінні теплові властивості [6, 7]. Газифікація пінополістиролу регулюється швидкістю теплообміну між металом і моделлю, яка, в свою чергу, визначається коефіцієнтом теплообміну. Коефіцієнт теплопередачі – це заданий коефіцієнт теплообміну на межі розділу між рідким металом та пінополістиролом. Груба оцінка середньої швидкості фронту металу проводиться в Flow-3D Cast за формулою [7]:

$$U_{front} \approx \frac{h_{m,f} \delta T}{\rho C_p \delta T + \rho h_{s,f} + \rho h_{f,g}}$$

де  $h_{m,f}$  – коефіцієнт теплопередачі між металом та пінополістиролом;  $\delta T$  – різниця температур між металом і пінополістиролом;  $\rho$  – щільність пінополістиролу;  $C_p$  –

## Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

питома теплоємність пінополістиролу;  $h_{m,f}$  – теплота плавлення пінополістиролу;  $h_{m,g}$  – теплота випаровування пінополістиролу.

Механізм розрахунку наступний. Коли метал потрапляє в контрольний об'єм, який містить пінополістирол, обчислюється тепло, яке передається піномоделі від рідкого металу протягом одного кроку в часі. Потім ця кількість тепла використовується для обчислення об'єму пінополістиролу, який розкладається і нагрівається до температури металу. При обчисленні кількості пінополістиролу, що розкладається, враховуються теплоти плавлення та випаровування пінополістиролу. Енергія, яка передається пінополістиролу, вираховується з металу. При цьому теплопровідність у піномоделі ігнорується. Метал просувається в порожнину, яка дорівнює кількості пінополістиролу, видаленого в кожному контрольному об'ємі. Порожнина визначається з точки зору компонентів швидкості на поверхні металу, що утримує рух металу в піномодель, до тих пір, поки тиск у металі є достатньо високим.

Flow-3D Cast не моделює безпосередньо потік газу, що утворюється при газифікації пінополістиролу, який, як відомо, разом з величиною газопроникності проти-пригарного покриття піномоделі впливають на процес заливання. На практиці при недостатній газопроникності покриття накопичення газів може створювати умови для руху металу назад із форми. Ефект газопроникності покриття врахований в моделі Flow-3D Cast приблизно через зміну коефіцієнта теплопередачі метал–піномодель. Це пояснюється так, що швидкість тепловіддачі знижується зі збільшенням газового зазору, зростання товщини якого відбувається через накопичення газів, викликане низькою газопроникністю покриття.

Flow-3D Cast дозволяє моделювати поверхневі дефекти та залишки пінополістиролу у виливку. Механізм формування поверхневих дефектів можна пояснити за допомогою фізичної моделі взаємодії рідкого металу з пінополістиролом, яку представлено на рис. 1. Під дією тепла рідкого металу відбувається оплавлення та часткова газифікація пінополістиролу. Внаслідок цього утворюється певний газовий зазор між фронтом розплаву та моделлю. Газу, які утворюються через випаровування моделі, створюють протитиск у газовому зазорі та більшою мірою видаляються через газопроникне проти-пригарне покриття і піщану форму під впливом вакууму. Також впродовж того, коли рідкий метал заповнює форму, частина пінополістиролу може утворювати рідку фазу, яка випадає на внутрішню поверхню виливка. В подальшому відбувається перетворення даної рідкої фази в газ, який може поглинатися металом. Якщо під час заливання форми в металі формуються складки або стику, будь-яка домішка на поверхні буде потрапляти в середину металу. Тобто захоплення залишків пінополістиролу призводить до формування дефектів, які знижують механічну міцність виливка.

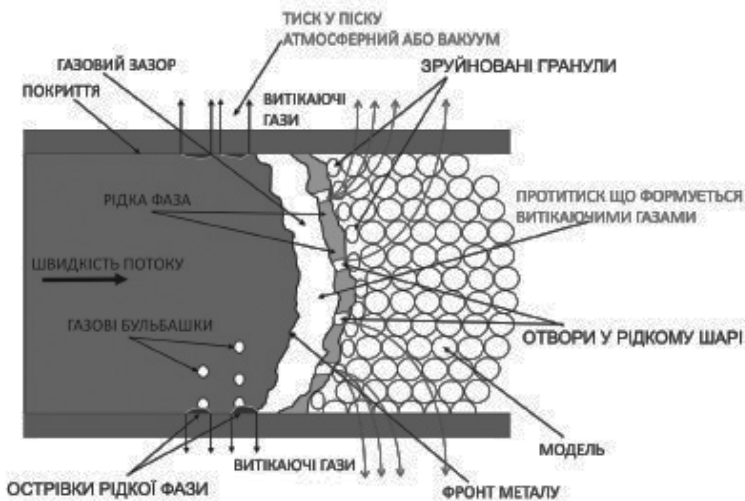


Рис. 1. Фізична модель руху розплаву при ЛГМ

## Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

У Flow-3D Cast є дві пов'язані моделі: модель відстеження дефектів поверхні, де поверхневі вклучення виникають в результаті утворення оксидів на поверхні, та модель відстеження залишків пінополістиролу, що газифікується, де поверхневі вклучення виникають із залишків вуглецю, що залишаються після плавлення, або газифікації пінополістиролу металом.

Алгоритм прогнозування поверхневих дефектів у FLOW-3D Cast складається з вихідних величин утворення оксиду, що пропорційний площі поверхні та часу взаємодії. Для дефектів, пов'язаних із залишками полістиролу, кількість дефектів пропорційна кількості газифікованого пінополістиролу. Розподіл забруднення в заповненій формі інтерпретується як розподіл ймовірності дефектів – місця локальних максимумів концентрації оксидних дефектів (плівок), швидше за все, будуть місцями дефектів. Однак на даний момент модель не враховує такі явища, як оксидна плівка, що прилипає до стінок форми і залишки піномоделі, що виходять через пористу піщану форму.

Залишки пінополістиролу, що утворюються на межі розділу метал–модель і не можуть бути переміщені потоком розплаву, відстежуються шляхом розв'язання рівняння перенесення залишку. Окрім того Flow-3D Cast дозволяє визначити холодні затвори (неспай), які утворюються в металі через великі тепловтрати, які йдуть на газифікацію моделі. Загалом СКМ ЛП Flow-3D Cast, не зважаючи на певні спрощення, дозволяє моделювати весь процес ЛГМ, передбачаючи де знаходяться складчастість або інші дефекти, пов'язані з захопленням пінополістиролу чи продуктів його розкладу.

Метою даної роботи було визначення дефектів, які утворюються у виливку зі сталі при литті за моделями, що газифікуються, за допомогою комп'ютерного моделювання та розробка заходів по їх запобіганню. В якості об'єкта дослідження обрано виливок «корпус вентиля DN80 PN40» зі сталі 20Л масою 19,7 кг.

При литті сталі за пінополістироловими моделями найкращим вважається сифонний підвід металу до виливка, оскільки це забезпечує меншу взаємодію розплаву з продуктами розкладання моделі. На основі цього розроблено перший варіант ливникової системи, який включає підведення металу знизу у фланці корпусу через два живильника. Модельний блок складався з двох моделей. Також для попередження потрапляння шлакових частинок в тіло виливка в каналі ливникової системи передбачено пінокерамічний фільтр. Для компенсації усадки сталі над круглими фланцями встановлено екзотермічні надливи, а на квадратному фланці – екзотермічні живильні випари.

Побудована в CAD-системі твердотільна модель виливка з ливниковою системою передавалася в програму Flow-3D Cast. Необхідні для моделювання дані – властивості сталі, пінополістиролу, кварцового піску, фільтрів та екзотермічних оболонок обрано з бази даних. Температуру заливання сталі задавали 1580 °С, початкова температура форми – 20 °С.

Результати моделювання процесу заливання за першим варіантом представлено на рис. 2. Отримані результати показали, що заповнення форми відбувається не-

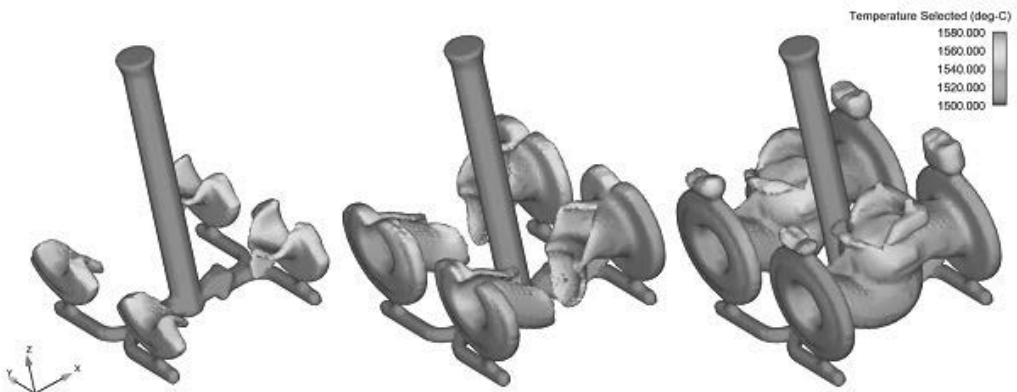


Рис. 2. Кінетика заповнення форми за першим варіантом ЛЖС

## Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

вномірно. Спочатку більшою мірою заповнюються фланці, а потім вже метал надходить до середньої частини виливки. При чому в середній частині при зустрічі двох потоків створювалися умови для охоплення пінополістиролу розплавом. В результаті продукти розкладу пінополістиролу у вигляді рідкої та газової фази не встигають видалитися з розплаву, що, в кінцевому рахунку, призводить до формування газових дефектів у тілі виливка.

Однією з переваг Flow-3D Cast є те, що вона дозволяє прогнозувати утворення поверхневих дефектів, пов'язаних із захопленням рідких і газоподібних продуктів розкладання пінополістиролу. Результати моделювання утворення поверхневих дефектів під час заливання (рис. 3) показують, що на початку заливання в одному з фланців відбувається формування поверхневих дефектів. Однак в процесі заливання концентрація дефектів у фланці зменшується, що, очевидно, пов'язано з поступовим видаленням продуктів деструкції полістиролу потоком розплаву. На момент повного заповнення форми концентрація поверхневих дефектів у тілі корпусу знижується.

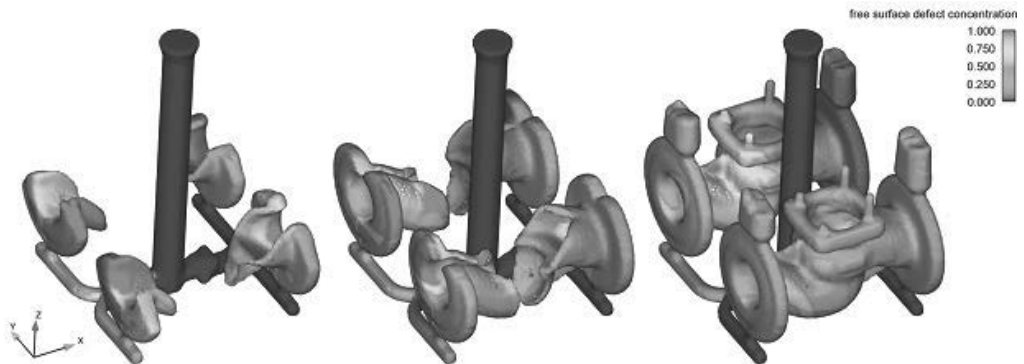


Рис. 3. Поверхневі дефекти у виливку (перший варіант ЛЖС)

Аналіз полів швидкості розплаву показав, що в середній частині виливка після моменту зустрічі двох потоків швидкість розплаву майже нульова. Утворюється так звана «застійна зона», в якій утворюються дефекти. Таким чином, перший варіант ливниково-живильної системи не забезпечує одержання бездефектного виливка.

Аналіз ливарних процесів, які відбуваються під час заливання виливка «корпус вентиля», показує, що необхідно створити умови для винесення продуктів деструкції потоком розплаву в надливи. Для вирівнювання фронту заливання додано третій живильник в центральну частину виливки. Моделювання другого варіанту ЛЖС (рис. 4) показало, що заповнення відбувається більш рівномірно, проте в цьому варіанті більша частина металу проходить через середній живильник. Це пов'язано з тим, що даний живильник розташований на колекторі ближче до стояка, ніж два інші. Не зважаючи на це, в даному варіанті майже відсутні вертикальні фронти

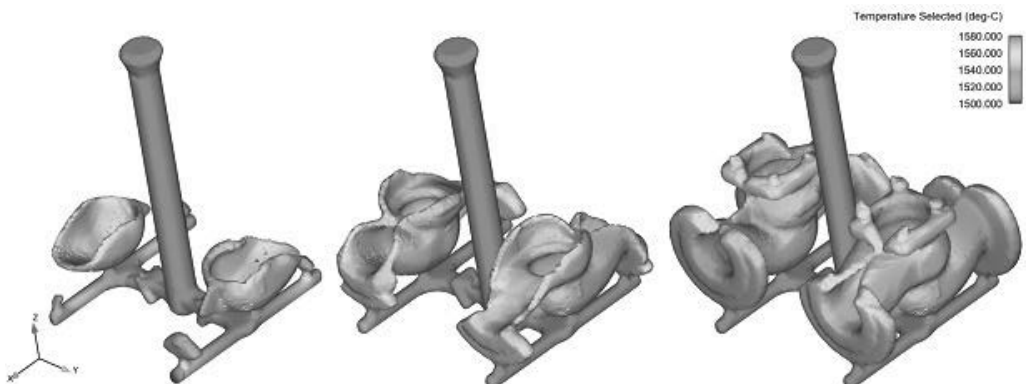


Рис. 4. Кінетика заповнення форми за другим варіантом ЛЖС

## Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

потіку розплаву, що позитивно впливає на видалення продуктів термодеструкції пінополістиролової моделі.

Результати розрахунку полів поверхневих дефектів (рис. 5) показують, що в ході заливання на фронті потоку відбувається утворення поверхневих дефектів, однак під кінець заливання концентрація дефектів знижується.

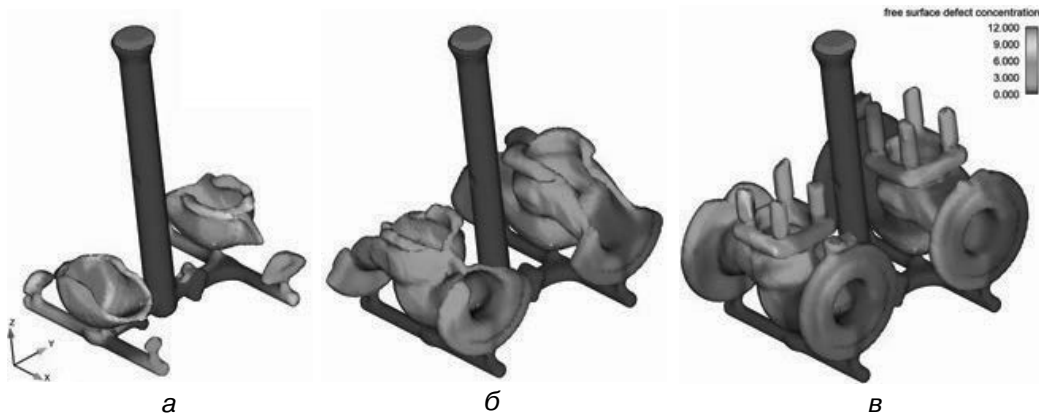


Рис. 5. Поверхневі дефекти у виливку (другий варіант ЛЖС)

Підсумовуючи, можна сказати, що другий варіант ЛЖС забезпечує одержання виливка з меншими дефектами.

При впровадженні у виробництво технології виготовлення виливка «корпусу вентиля» можна рекомендувати взяти за основу другий варіант ЛЖС. При цьому, щоб вирівняти фронт підйому металу, необхідно змінити площі перетину живильників так, щоб площа перетину середнього живильника була меншою на 25 % за площу крайніх живильників.

Аналіз фізичних та математичних моделей процесу ЛГМ системи Flow-3D Cast показав, що вони мають ряд спрощень та не враховують процеси виділення газу під час газифікації піномоделі, зміни величини вакууму в об'ємі ливарної форми та його вплив на хід заливання сплаву. Однак, не зважаючи на це, дана СКМ ЛП дозволяє ідентифікувати місця утворення складчатості та інших дефектів, пов'язаних із захопленням пінополістиролу чи продуктів його розкладу.

Комп'ютерне моделювання в системі Flow-3D Cast дозволило для виливка «корпус вентиля» дослідити гідродинаміку заповнення форми та місця формування дефектів. Що в кінцевому рахунку дало змогу оптимізувати ливникову систему, яка забезпечила спокійне і рівномірне заливання сплаву по всьому перетину виливка і з мінімальним утворенням поверхневих дефектів.

### **Список літератури**

1. Калюжный П. Б., Кротюк С. О., Левчук М. Т. Технологические процессы получения стальных литых изделий для запорной трубопроводной арматуры по газифицируемым моделям. *Литье и металлургия*. 2018. № 1 (90). С. 22–27.
2. Rong L., Lunjun C., Ming S., Qi Z., Yong L., & Heng W. Simulation and Casting Process of Aluminum Alloy Multi-Way Valve Body with Various Gating Systems. *Archives of Foundry Engineering*. 2018. Vol. 18. Iss. 2. P. 84–94.
3. Panchal P. G., Joshi S. J., & Ghetiya N. D. Design and analysis of gating and risering system for casting of ball valves. *Nirma University Journal of Engineering and Technology*. 2015. Vol. 4. Iss. 1. P. 1-5.
4. Qin S., Lv P., Li S., & Li Y. Casting process of gate valve steel based on ProCAST simulation. In *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1798. No. 1, 012013.

5. Khan M. A. A., & Sheikh A. K. A comparative study of simulation software for modelling metal casting processes. *International Journal of Simulation Modelling*. 2018. Vol. 17 (2). P. 197–209.
6. Barkhudarov M. R. Advanced simulation of the flow and heat transfer processes in simultaneous engineering. *Flow Sci. Inc.* 1998. 1257.
7. <https://www.flow3d.com/>

Надійшла 02.08.2021

## **References**

1. Kaliuzhnyi, P.B., Krotuk, S.O., Levchuk, M.T. (2018). The production technological processes of steel cast products for shut-off valves by casting on lost foam casting. *Foundry production and metallurgy*. 1, pp. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-1-22-27> [in Russian]
2. Rong, L., Lunjun, C., Ming, S., Qi, Z., Yong, L., & Heng, W. (2018). Simulation and Casting Process of Aluminum Alloy Multi-Way Valve Body with Various Gating Systems. *Archives of Foundry Engineering*, vol. 18, iss. 2, pp. 84-94. DOI: 10.24425/122507. [in English]
3. Panchal, P. G., Joshi, S. J., & Ghetya, N. D. (2015). Design and analysis of gating and risering system for casting of ball valves. *Nirma University Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, iss. 1, pp. 1-5. [in English]
4. Qin, S., Lv, P., Li, S., & Li, Y. (2021). Casting process of gate valve steel based on ProCAST simulation. In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1798, no. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/1798/1/012013. [in English]
5. Khan, M. A. A., & Sheikh, A. K. (2018). A comparative study of simulation software for modelling metal casting processes. *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 17, iss. 2, pp. 197-209. DOI: 10.2507/IJSIMM17(2)402. [in English]
6. Barkhudarov M. R. (1998). Advanced simulation of the flow and heat transfer processes in simultaneous engineering. *Flow Sci. Inc.*, 1257. [in English]
7. <https://www.flow3d.com/>

Received 02.08.2021

**I. A. SHALEVSKA**, *Dr. Sci. (Engin.), Deputy Head of Department;*

*e-mail: innashalevska@gmail.com; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8410-7045>*

**P. B. KALIUZHNYI**, *PhD (Engin.), Senior Researcher; e-mail: kpb.ptima@gmail.com;*

*ORCID <http://orcid.org/0000-0002-1111-4826>*

**E. V. POHREBACH**, *Postgraduate; e-mail: x1an@ukr.net;*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7190-2691>*

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

## **USING COMPUTER SIMULATION TO IDENTIFY DEFECTS FORMATION IN STEEL CASTINGS OF SHUT-OFF VALVES CASTED WITH LOST FOAM PROCESS**

*The results of computer simulation of the technological process of making a steel casting "Valve body DN80 PN40" produced with lost foam casting process are presented. The simulation is carried out using the Flow-3D Cast program to determine defects that can be formed in a casting during thermal decomposition of polystyrene foam pattern. The features of the Flow-3D Cast software product are analyzed for adequacy of the modeling results and their compliance with a field test. It is determined that the base of the calculation is the average speed of the metal front calculated through the heat transfer coefficient between metal and polystyrene foam, with the foam pattern described as a constant temperature barrier. It is determined that the prediction algorithm of surface defects in Flow-3D Cast consists of the initial values of the formation of oxide, which is proportional to the surface area and time of interaction, meanwhile the model does not take into account such phenomena as an oxide film that adheres to the walls of the form and the foam decomposition products that escape through a porous sand form. The mechanism of surface defects formation was investigated and explained by the physical model of the interaction of liquid metal with polystyrene foam. The results of "valve body DN80 PN40" casting simulation using Flow-3D Cast is presented*

## **Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття**

*with two variants of the gating system, the kinetics of the mould filling in the presence of polystyrene foam pattern and the surface defect formation probability is investigated. The optimal variant of the gating system is determined, namely the metal should be fed to the casting from below by means of three gates - in the flange and the middle part of the body, which eliminates the formation of "stagnation zones" at the meeting points of melt flows. It has been verified that the computer simulation system Flow-3D CAST allows to identify the places of folds formation and other defects associated with foam and foam degradation products entrapment.*

**Keywords:** *lost foam casting, polystyrene foam patterns, computer simulation, casting defect formation, gating system.*

### **До уваги авторів!**

*Статті, що надходять в редакцію, повинні мати анотації і ключові слова українською та англійською мовами. Об'єм статті - не більше 12 стор., малюнків – не більше 5.*

*Статті подаються як на папері, так і в електронному форматі. Для текстових матеріалів бажано використати формат doc. Для графічних матеріалів – jpeg. Графічні матеріали необхідно зберігати в окремих файлах. Фотографії, малюнки, графіки і креслення мають бути чорно-білими, чіткими і контрастними.*