

## ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

### TECHNOLOGIES OF OBTAINING AND PROCESSING OF CONSTRUCTION MATERIALS

УДК 621.74.04

- Калюжний П. Б. канд. техн. наук, заступник директора з наукової роботи Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України, м. Київ, Україна, *e-mail: kpb.ptima@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-1111-4826
- Шалевська І. А. д-р техн. наук, доцент, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України, м. Київ, Україна, *e-mail: into66@ukr.net*, ORCID: 0000-0002-8410-7045
- Шинський О. Й. д-р техн. наук, професор, завідувач відділу фізико-хімії ливарних процесів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України, м. Київ, Україна, *e-mail: aluprt@ukr.net*, ORCID: 0000-0001-6200-0709

## РОЗРОБЛЕННЯ ЛИВАРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ ЛИТОГО ЗАХИСНОГО МОДУЛЮ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ

**Мета роботи.** Розроблення ливарної технології одержання порожнистого виливка захисного модулю литтям за моделями, що газифікуються.

**Методи дослідження.** Використано комп'ютерне моделювання ливарних процесів та проведено практичні експерименти.

**Отримані результати.** На основі аналізу процесів при заливанні металу за допомогою комп'ютерного моделювання встановлено гідродинамічні умови заливання виливка захисного модулю з різними ливниковими системами. При верхній розосередженій ливниковій системі заповнення відбувається від центру до країв, при цьому гідродинамічний натиск металу обумовлює нерівномірне заливання стінок виливка, в результаті чого формується великий фронт потоку металу. При нижній односторонній ливниковій системі площа фронту потоку зменшується, а заповнення форми відбувається рівномірно, що усуває вірогідність утворення обвалів. Результати моделювання процесів тверднення металу продемонстрували, що у виливку модуля відсутні усадкові раковини, але є незначна мікропоруватість, обумовлена конструкцією виливка.

**Наукова новизна.** Визначено, що утворення дефекту обвал у виливку з верхньою ливниковою системою при литті за моделями, що газифікуються, відбувається через великий фронт потоку металу, який призводить до надмірного виділення газів і формування умов низького вакууму в стрижневих частинах ливарної форми, внаслідок чого при ударній дії струменя металу відбувається локальне руйнування піску.

**Практична цінність.** Оптимізовано ливникову систему та в цілому технологічний процес одержання зі сталі литих захисних модулів литтям за моделями, що газифікуються.

**Ключові слова:** сталеві виливки, лиття за моделями, що газифікуються, ливникова система, комп'ютерне моделювання, технологічний процес, заливання, тверднення, ливарні дефекти.

### Вступ

Сьогодні для України існує актуальна потреба у покращенні заходів захисту цивільних людських і матеріальних ресурсів, а також у збільшенні стійкості захисних споруд, будівель, сховищ і укриттів. Окрім конструкторських задач, які полягають в проєктуванні багатофункціональних захисних споруд, виникає необхідність у розробленні новітніх технологій виготовлення таких споруд. Модульні металоконструкції, як різновид швидкозбірних захисних споруд, мають перевагу повторного використання. За рахунок своєї конструкції їх можна швидко демонтувати та перевез-

ти на інше місце [1]. Використання литих металевих матеріалів є одним із ефективних рішень для захисних споруд модульного типу [2]. Серед ливарних технологій для одержання складнопрофільних литих конструкцій, включаючи композитні, однією із найбільш економічно ефективних є лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ) [3, 4].

При розробленні ливарної технології виготовлення виливка ефективним інструментом є комп'ютерне моделювання ливарних процесів. Його використання скорочує час і виробничі витрати, особливо на етапах проєктування та промислового опробування розробленого технологічного процесу. Сучасні моде-

люючі програми [5] дозволяють досить точно прогнозувати утворення усадкових раковин, поруватості, неметалевих вкраплин, гарячих та холодних тріщин при литті в традиційні піщані форми, в цюль та литті під тиском.

Зазвичай, комп'ютерне моделювання використовують при розробленні технологічних процесів виготовлення виливків. Також існують приклади його використання для розрахунку напружень у литих деталях під час їх експлуатації [6]. Такий комплексний підхід дозволяє оптимізувати конструкцію литої деталі, запобігти утворенню ливарних дефектів, зменшити масу конструкції та знизити витрати на її виготовлення. Наприклад, в роботі [7] моделювання процесів заливання форми та затвердіння сталевих виливків дозволило передбачити появу усадкової поруватості та провести оптимізацію конструкції сталевих деталей зварного вузла.

На відміну від традиційної технології лиття у порожнисті піщані форми при ЛГМ в формі наявна радова піномодель, зазвичай, пінополістиролова, яка під час заливання форми газифікується теплом рідкого металу. Взаємодія рідкого металу та піномоделі супроводжується фізичними і хімічними процесами, які досить складно описати математично. Існуючі програми, які можуть моделювати процес ЛГМ, зводять моделювання заливання до точного опису динаміки межі розділу метал-модель, який в основному визначається теплообміном між металом та піномоделлю [8]. Незважаючи на те, що моделюючі програми мають ряд спрощень і не враховують всі особливості ЛГМ, вони успішно використовуються для оптимізації ливникових систем (ЛС) та прогнозування утворення ливарних дефектів, включаючи специфічні для ЛГМ [9, 10].

В роботах [1, 3] наведено приклади литих конструкцій, що можуть бути використані для модульних захисних споруд. Проте в них не описуються конкретні виливки, технологічні процеси їх виготовлення та складності, які можуть виникнути при їх литті. У відділі фізико-хімії ливарних процесів ФТІМС НАН України розроблено конструкції литих модулів захисних споруд, які представляють собою сталеву оболонку з функціональним наповнювачем з неметалевого вогнетриву. Зважаючи, що середня товщина стінки металевої оболонки модулю складає 10 мм при габаритах 400x400 мм, одержання такого виробу зі сталі ливарним методом є непростю задачею, і потребує використання сучасних підходів у проєктуванні ливарної технології.

### Мета роботи

Мета роботи полягала у розробленні ливарної технології одержання порожнистих виливків захисних модулів литтям за моделями, що газифікуються. Для цього необхідно було оптимізувати ливникову систему, провести аналіз гідродинамічних та теплообмінних процесів при заливанні та твердненні виливка за допомогою комп'ютерного моделювання, визначити причини формування обвалів при ЛГМ та розробити заходи для їх попередження.

### Матеріал і методика досліджень

Для комп'ютерного моделювання процесів заливання, тверднення та охолодження виливка за моделями, що газифікуються, було використано програмне забезпечення Flow-3D Cast. Дана програма дозволяє моделювати поверхневі дефекти та залишки пінополістиролу у виливку, при розрахунку температурних полів розплаву враховує енергію, яку було витрачено на газифікацію пінополістиролу [11]. Побудовані в САД-системі 3D-креслення виливка з ЛС зберігали у форматі STL і завантажували в програму Flow-3D Cast. Необхідні для моделювання параметри – властивості сталі 35Л, пінополістиролу та кварцового піску були обрані з бази даних. Температура заливання сталі задавалася 1580 °С, початкова температура форми – 20 °С.

При практичних дослідженнях використовували пінополістиролові моделі (густиною 28 кг/м<sup>3</sup>), які одержували спіканням у прес-формі автоклавним методом. До моделей приклеювали ливникову систему, після чого на модельний блок наносили водне протипригарне покриття. Після висихання протипригарного покриття модельні блоки формували в сухому кварцовому піску, який ущільнювали за допомогою вібрації. Заливання форм виконували сталлю 35Л, яку виплавляли в індукційній печі ІСТ-016. Під час заливання форми ливарний контейнер підключали до вакуумної системи, яка видаляла з форми продукти деструкції пінополістиролової моделі. Після охолодження виливків проводили відокремлення ливників, очищення їх поверхні від залишків протипригарного покриття і дослідження якості виливків.

### Результати досліджень та їх обговорення

Враховуючи особливості конструкції виливка захисного модулю, було спроектовано та розраховано верхню ЛС, в якій стояк розташовувався посередині виливка, щоб забезпечити мінімальний шлях рідкого металу від стояка до країв виливка. Через масивний колектор, який також слугував надливом для компенсації усадки, метал підводився до виливка розосереджено через 8 живильників. З цієї ЛС було виготовлено дослідну партію виливків методом ЛГМ. У виливках були виявлені несучільності в центральній частині (рис. 1), які можна класифікувати як обвал.



Рисунок 1. Дефект у тілі виливка

Обвал – неправильної форми порожнини в тілі виливка, що заповнені піском, утворюються в результаті місцевого руйнування форми [12]. Причинами може бути ударна дія струменя металу на стінку форми, занадто повільна швидкість заливання форми, недостатня міцність форми через мале розрідження при заливанні та ін. [13].

Для визначення точних причин формування дефектів у виливку модулю та оптимізації ЛС було проведено комп'ютерне моделювання ливарних процесів. Результати комп'ютерного моделювання процесу заливання виливка з першим варіантом ЛС показані на рис. 2. Розрахунковий час заливання виливка склав 8,5 с. Результати демонструють, що спочатку заповнення відбувається через центральні живильники з поступовим «включенням» крайніх живильників. Гідродинамічний натиск металу обумовлює швидше заливання «стілки» виливка протилежної стояку. При цьому інша «стілка» заповнюється більшою мірою через перемички. Такий характер заливання призводить до формування великого фронту потоку.

Поля концентрації продуктів деструкції пінополістиролу показують, що в нижній та бічних частинах виливка існує ймовірність формування поверхневих дефектів. Це може бути обумовлено тим, що заміщення моделі відбувається не рівномірно, а утворена ливарна порожнина заповнюється з різних сторін, формуючи декілька фронтів потоку, які при з'єднанні можуть містити вуглецеві чи окисні плівки. На фронті потоку відбувається накопичення продуктів деструкції моделі, тому для віддалених від живильників частин виливка концентрація даних дефектів вища. Під кінець заливання температура металу у виливку знаходиться в межах 1530-1550 °С. При цьому верхня частина має вищу температуру, що створює умови для спрямованого тверднення виливка.

Утворення обвалу в виливках обумовлено специфікою ЛГМ. Відомо [14], що в кінетичній зоні взаємодії розплаву з піно моделлю має підтримуватись певний тиск газів, який би запобігав осипання (руйнуванню) піску. Тиск у зазорі метал-модель залежить від кількості газів, що виділяються при деструкції піно моделі, і від обсягу газів, що фільтруються через протипригарне покриття і пісок [15]. Великий фронт потоку збільшує кінетичну зону та призводить до надмірного виділення газів. В стрижневих частинах ливарної форми створюються умови для зони низької дії вакууму. Пропускна здатність піску не дозволяє видалити газу настільки швидко, щоб не відбулося зниження рівня вакуума до критичного рівня. Внаслідок цього у стрижневих частинах статична рівновага системи порушується і пісок обвалюється. Оскільки найвіддаленішою областю форми від вакуумної системи контейнера є саме центральна ділянка стрижневої частини, то ймовірність утворення обвалів в центрі виливка є найвищою.

Для створення умов заповнення форми від одного краю до іншого запропоновано другий варіант ЛС, в якому стояк зміщено до одного краю колектора. Результати моделювання процесу заливання з другим варіантом ЛС показані на рис. 3. Розрахунковий час заливання в цьому випадку склав 12,5 с. Результати демонструють, що спочатку заповнюється колектор, далі метал надходить в живильники, а потім в ливарну порожнину. Фронт металу рухається справа - наліво та зверху - вниз одночасно, проте на фронті періодично утворюються локальні потоки, які випалюючи модель можуть викликати формування місцевих обвалів. Площа фронту металу протягом всього періоду заливання є меншою ніж в першому випадку, тому вірогідність формування дефектів все ж є меншою.

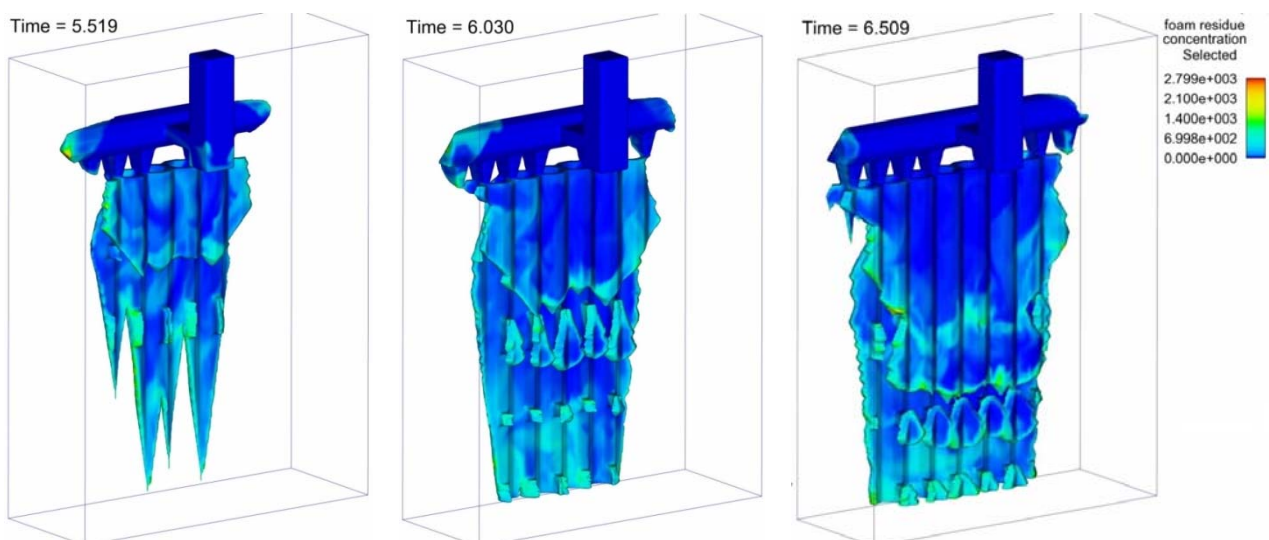


Рисунок 2. Поля концентрації продуктів деструкції пінополістиролу під час заливання через верхню розосереджену ЛС

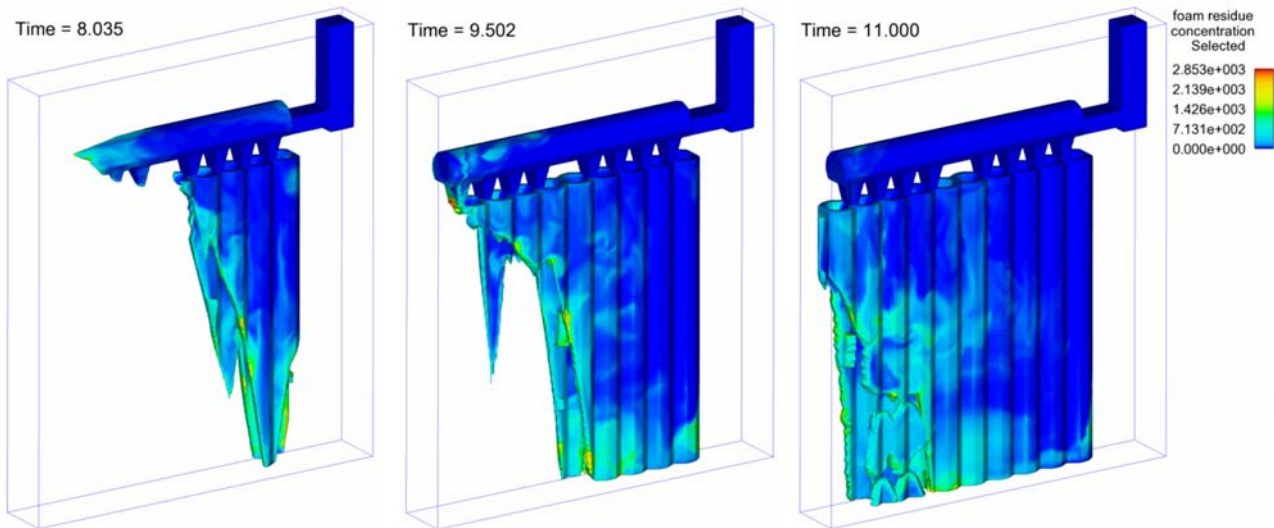


Рисунок 3. Поля концентрації продуктів деструкції пінополістиролу під час заливання з другим варіантом ЛС

Як показують поля концентрації продуктів деструкції пінополістиролу (див. рис. 3), можливе утворення поверхневих дефектів у найвіддаленішій від стояка частині виливка. Температура модулю під кінець заливання є майже рівною по всьому перетину виливка. При цьому верхня частина на 10–15 °С має вищу температуру за нижню, що сприяє спрямованому твердінню виливка.

Вважається, що при ЛГМ для сталевих виливків рівномірне заповнення і поступову газифікацію моделі забезпечує нижня (сифонна) ливникова система. Тому третій варіант ЛС передбачав нижнє одностороннє підведення металу з встановленням верхнього надливу. Результати моделювання заливання з третім варіантом ЛС показані на рис. 4 і 5. Триваліший час заливання виливка (22,7 с) обумовлений більшою довжиною стояка та меншою швидкістю заливання,

яка для сифонної ЛС істотно залежить від статичного натиску металу. Заповнення відбувається з однієї сторони. Фронт металу рухається знизу догори та справа вліво.

Площа фронту металу за весь період заливання є меншою ніж в двох попередніх випадках, тому вірогідність формування обвалів є меншою. Як показують поля концентрації продуктів деструкції пінополістиролу можливе утворення дефектів у найвіддаленішій від стояка частині виливка. Це можна усунути за рахунок встановлення промивника в даному місці.

Під кінець заливання температура металу у верхній та середній частині виливка знаходиться в межах 1520–1540 °С, а зони біля живильника метал є найгарячішим – 1550–1560 °С. Такі температурні поля більше сприятливі для одночасного твердіння виливка.

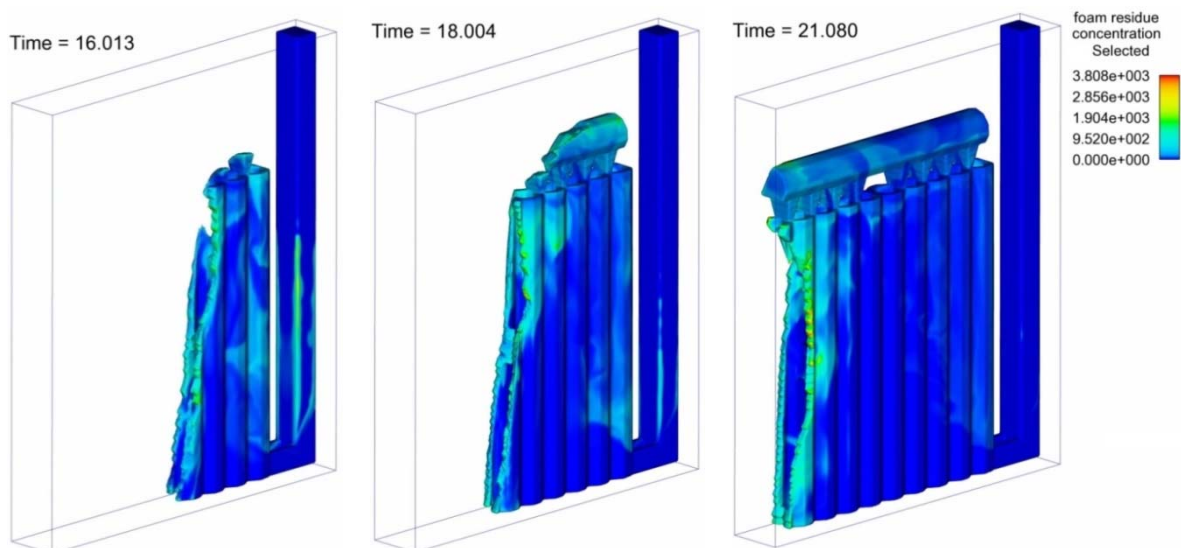


Рисунок 4. Поля концентрації продуктів деструкції пінополістиролу під час заливання виливка через нижню ЛС



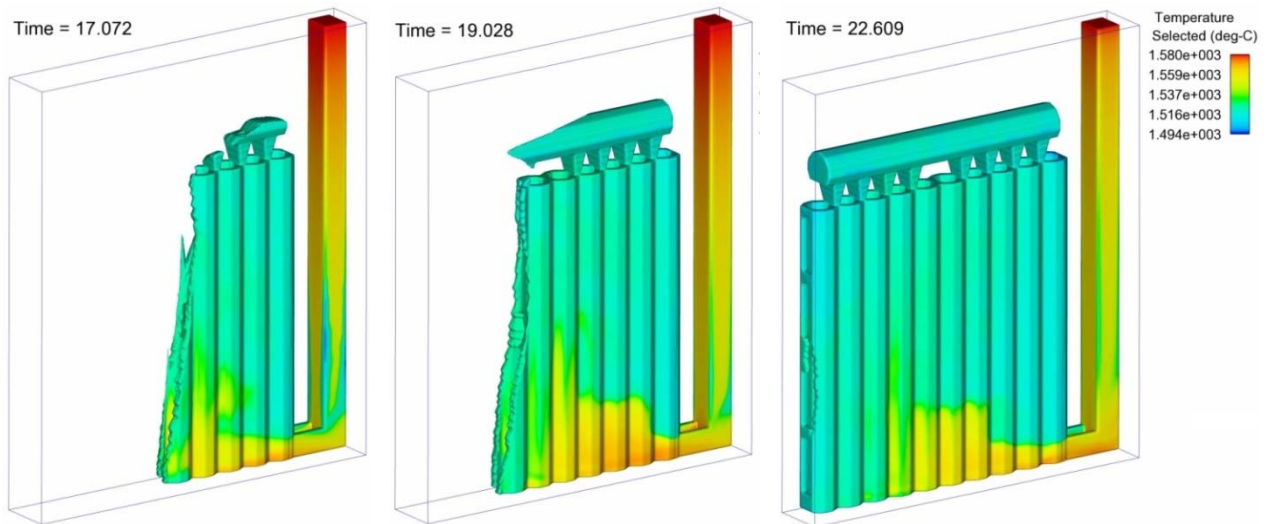


Рисунок 5. Температурні поля виливка в процесі заливання через нижню ЛС

Для прогнозування якості виливка було проведено моделювання процесів тверднення і охолодження виливка. Тривалість тверднення виливка з першим варіантом ЛС склала близько 120 с. Кінетика тверднення показала, що швидше тверднуть краї та нижня частина, верхня частина та «термічні вузли» в центрі виливка тверднуть пізніше. Такий характер тверднення обумовлений не тільки конструкцією виливка та ливникової системи, а й умовами теплопровідності. Відведення тепла інтенсивніше в крайніх та нижній частинах виливка, про що свідчать температурні поля. Колектор охолоджується повільніше за тіло виливка, оскільки містить найгарячіший метал під кінець заливки. Результати розрахунку усадкових полів показують, що у виливку модуля відсутні усадкові раковини та мікропоруватість, окрім незначних дрібних пор в центральних перемичках.

Результати моделювання процесів тверднення та охолодження виливка з другим варіантом ЛС продемонстрували, що тверднення виливка має такий же характер, як і в першому варіанті. Проте в цьому варі-

анті довше твердне ливникова система (стояк і колектор), що обумовлене бічним розташуванням стояка. Тривалість тверднення виливка складає так само 120 с. Умови теплопровідності такі ж як і попередньому випадку – швидше охолоджуються краї та низ виливка. У виливку майже відсутні усадкові раковини, однак спостерігається незначна мікропоруватість у тілі виливка.

Процес тверднення виливка з нижнім підводом (рис. 6) дещо відрізняється від попередніх варіантів. В цьому випадку в останню чергу тверднуть не тільки центральні перемички, але і нижня частина біля живильника. Це обумовлене температурними полями, які формуються після заливання металу. У місці живильника метал розігріває форму протягом заливання, внаслідок чого це місце охолоджується повільніше. Теплові умови в цьому випадку менш сприятливі для спрямованого твердіння виливка. Не зважаючи на це, колектор-надлив живить верхню частину виливка під час її затвердіння.

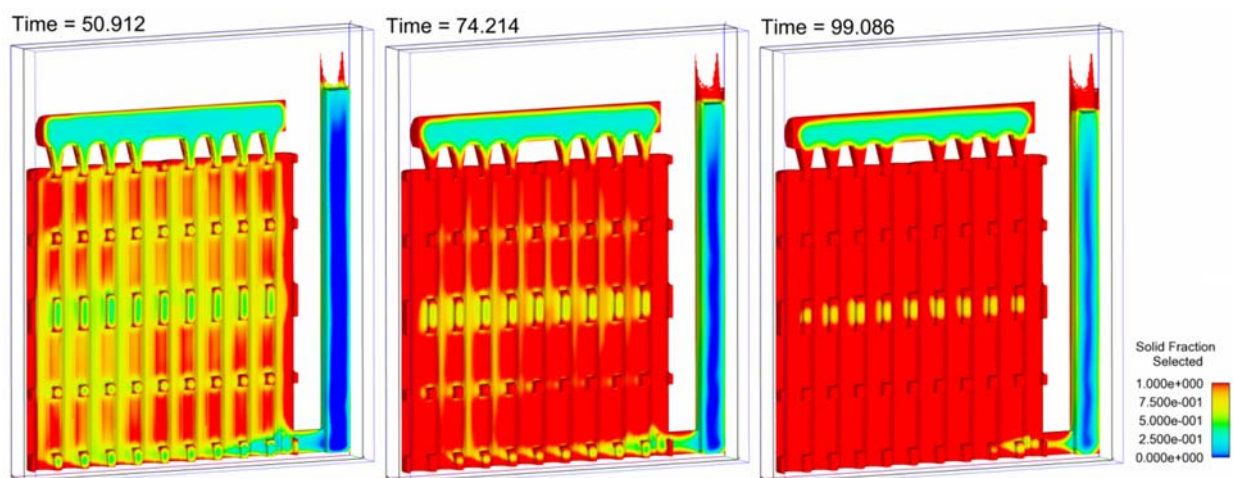


Рисунок 6. Кількість твердої фази металу в ході затвердіння виливка

Результати розрахунку усадкових полів (рис. 7) показують, що у виливку модуля є незначні усадкові раковини в центральних перемичках. Незначна мікропоруватість, кількість якої зросла у порівнянні з попереднім варіантом, більше зосереджена в нижній частині виливка та зміщена в бік живильника.

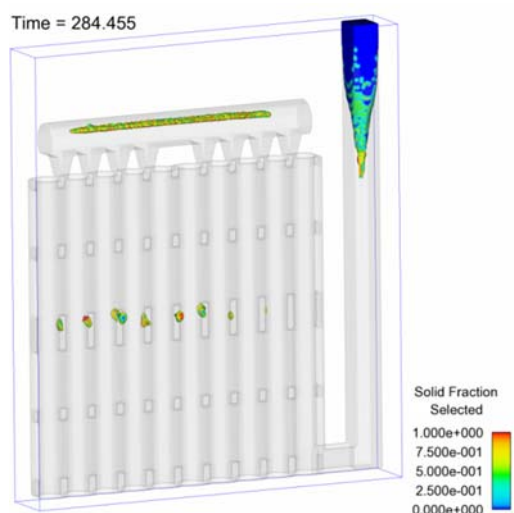


Рисунок 7. Усадка та мікропоруватість у виливку

Серед розглянутих варіантів загалом кращі умови для заливання рідкої сталі в форму створюються при нижній однобічній ЛС (третій варіант). Кращі умови тверднення та відповідно менша усадкова дефектність спостерігається при верхньому підведенні металу. Однак найбільш оптимальною ЛС можна вважати третій варіант, оскільки він забезпечує оптимальні умови для заливання металу у форму, усуваючи загрозу утворення обвалів, та задовільні умови тверднення виливка.

З урахуванням результатів моделювання усадки було проведено коригування конструкції виробу – усунуто термічні вузли в центральній частині виливка. Після цього було виготовлено дослідну партію виливків модулів з нижньою ЛС. Виливки не мали обвалів чи інших поверхневих дефектів і загалом відповідали технічним умовам до них.

### Висновки

1. Проведено аналіз гідродинамічних та теплообмінних процесів при заливанні та твердненні виливка захисного модулю за допомогою комп'ютерного моделювання. Встановлено, що кращі гідродинамічні умови заливання виливка створюються при нижній однобічній ливниковій системі.

2. Визначено умови формування дефекту обвалу у виливку захисного модулю. При верхній розосередженій ливниковій системі формується великий фронт потоку металу, що призводить до надмірного виділення газів і формування умов низького вакууму в стрижневих частинах ливарної форми. Внаслідок

цього та ударної дії струменя металу відбувається локальне руйнування піску.

3. Результати дослідження дозволили оптимізувати ливникову систему та в цілому технологічний процес одержання литих захисних модулів зі сталі литтям за моделями, що газифікуються.

### Список літератури

1. Шинський О. Й. Біонічний підхід до виготовлення литих легковагих металокопункцій для будівництва споруд модульного типу [Текст] / О. Й. Шинський, П. Б. Калюжний, В. С. Дорошенко // Процеси лиття. – 2022. – № 4. – С. 53–64. doi: <https://doi.org/10.15407/plit2022.04.063>

2. Огляд застосування металевих литих матеріалів у будівництві підземних та захисних споруд [Текст] / І. А. Шалевська, В. С. Дорошенко, П. Б. Калюжний, Ю. Г. Квасницька // Метал та лиття України. – 2022. – № 4. – С. 54–61 doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.04.054>

3. Шинський В. О. Литі елементи модульних будівельних металокопункцій за моделями, що газифікуються [Текст] / В. О. Шинський, В. С. Дорошенко // Метал та лиття України. – 2022. – №3. – С 65–71. doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.065>

4. Status quo and development trend of lost foam casting technology [Text] / F. Zitian, J. Wenming, L. Fuchu, X. Botao // China Foundry. – 2014. – 11. – P. 296–307.

5. Danylchenko L. Comparative analysis of computer systems for casting processes simulation. [Text] : proc. inter. conf. / L. Danylchenko // Advanced applied energy and information technologies 2021, TNTU, 2021. – P. 105–113.

6. Pysz S. The Analysis of Prototype Cast Constructions and the Assessment of their Technological and Exploitation Properties [Text] / S. Pysz, R. Żuczek // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 237. – P. 215–220. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.237.215>

7. Numerical simulation and casting process optimization of cast steel node [Text] / L. You, L. Yao, X. Li, G. Jia, G. Lv // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 126. – P. 5215–5225. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11460-8>

8. Шалевська, І. А. Використання комп'ютерного моделювання для ідентифікації дефектів, що утворюються у сталевих виливках корпусів запірної арматури при литті за моделями, що газифікуються [Текст] / І. А. Шалевська, П.Б. Калюжний, Є. В. Погребач // Процеси лиття. – 2021. – № 3. – С. 53–60. doi: <https://doi.org/10.15407/plit2021.03.053>

9. Numerical analysis of lost foam casting for large-caliber water meter shell [Text] / J. Huang, Y. X. Lin, W. P. Chen, X. J. Qi // Advances in Mechanical Engineering. – 2021. – 13(6). doi: <https://doi.org/10.1177/16878140211028059>

10. Simulations and experiments of mould filling in lost foam casting [Text] / F. Li, H. Zhao, F. Ren, Sh. Song, X. Shao, A. Volinsky // International Journal of

Cast Metals Research. – 2020. – 33:4-5 – P. 194–200.  
doi: <https://doi.org/10.1080/13640461.2020.1822572>

11. FLOW-3D CAST [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.flow3d.com/>

12. Озеров В. А. Литье по моделям из пенополистирола [Текст] / В. А. Озеров, В. С. Шуляк, Г. А. Плотников. – М. : Машиностроение, 1970. – 183 с.

13. Литье по газифицируемым моделям [Текст] / Под ред. Ю. А. Степанова. – М. : Машиностроение. – 1976. – 224 с.

14. Gas Pressure Effect on Sand Collapse in Kinetic Zone of Lost-Foam Casting [Text] / J. M. Jeon, S. J. Lee, K. H. Choe, J. S. Huh // Advances in Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2020. – Article ID 5861017. – 9 pages. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/5861017>

15. Kaczorowski R. Test bench for analyzing the Lost Foam Process [Text] / R. Kaczorowski, P. Just, T. Pacyniak // Archives of Foundry Engineering. – 2013. – 13 (1). – С. 57–62. doi: 10.2478/afe-2013-0011

Одержано 08.11.2023

## DEVELOPMENT OF A FOUNDRY TECHNOLOGY FOR OBTAINING A CAST PROTECTIVE MODULE BY LOST FOAM CASTING

Kaliuzhnyi P. Ph. D., Deputy Director for Scientific Work, Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine, *e-mail*: [kpb.ptima@gmail.com](mailto:kpb.ptima@gmail.com), ORCID: 0000-0002-1111-4826

Shalevska I. Dr. Sc., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Department of Physical Chemistry of Foundry Processes, Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine, *e-mail*: [into66@ukr.net](mailto:into66@ukr.net), ORCID: 0000-0002-8410-7045

Shinsky O. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Physical Chemistry of Foundry Processes, Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine, *e-mail*: [aluprt@ukr.net](mailto:aluprt@ukr.net), ORCID: 0000-0001-6200-0709

**Purpose.** Development of a foundry technology for obtaining a hollow casting of a protective module by lost foam casting.

**Research methods.** Computer simulation of foundry processes was used and practical experiments were carried out.

**Results.** Based on the analysis of metal pouring processes using computer simulation, the hydrodynamic conditions for pouring the protective module casting with different gating systems were established. With the upper distributed gating system, filling occurs from the center to the edges. At the same time, the hydrodynamic pressure of the metal causes uneven filling of the walls of the casting, as a result of which a large metal flow front is formed. With the lower one-sided downpour system, the area of the flow front decreases, and the filling of the mold occurs evenly, which eliminates the possibility of sand collapse. The results of simulation of metal solidification processes showed that there are no shrinkage holes in the casting of the module, but there is a slight microporosity due to the construction of the casting.

**Scientific novelty.** It was determined that the formation of a collapse defect in a casting with the upper gating system during lost foam casting occurs due to a large front of the metal flow, which leads to excessive release of gases and the formation of low vacuum conditions in the core parts of the mold, as a result of which the impact of the jet metal occurs local sand collapse.

**Practical value.** The gating system and the overall technological process of obtaining cast protective modules from steel by lost foam casting were optimized.

**Key words:** steel castings, lost foam casting, gating system, computer simulation, technological process, pouring, solidification, casting defects.

### References

1. Shinsky, O. Y., Kaliuzhnyi, P. B., Doroshenko, V. S. (2022). Bionichnyj pidhid do vygotovlennja lytyh legkovagyh metalokonstrukcij dlja budivnyctva sporud modul'nogo typu [Bionic approach to the manufacture of cast lightweight metal structures for the construction of

modular structures]. Casting processes, 4, 53–64. doi: <https://doi.org/10.15407/plit2022.04.063>

2. Shalevska, I. A., Doroshenko, V. S., Kaliuzhnyi, P. B., Kvasnytska, Y. H. (2022). Ogljad zastosuvannja metalevyh lytyh materialiv u budivnyctvi pidzemnyh ta zahysnyh sporud [Review of the use of cast metal materi-

- als in the construction of underground and protective structures]. *Metal and Casting of Ukraine*, 4, 54–61. doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.04.054>
3. Shinsky, V. O., Doroshenko, V. S. (2022). Lyti elementy modul'nyh budivel'nyh metalokonstrukcij za modeljamy, shho gazyfikujut'sja [Cast elements of modular building metal structures for their production by Lost Foam Casting]. *Metal and Casting of Ukraine*, 3, 65–71. doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.065>
4. Zitian, F., Wenming, J., Fuchu, L., Botao, X. (2014). Status quo and development trend of lost foam casting technology. *China Foundry*, 11, 296–307.
5. Danylchenko, L. (2021). Comparative analysis of computer systems for casting processes simulation. *Proceedings of the International Conference Advanced applied energy and information technologies 2021*. TNTU, 105–113.
6. Pysz, S., Żuczek, R. (2015). The Analysis of Prototype Cast Constructions and the Assessment of their Technological and Exploitation Properties. *Solid State Phenomena*, 237, 215–220. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.237.215>
7. You, L., Yao, L., Li, X., Jia, G., Lv G. (2023). Numerical simulation and casting process optimization of cast steel node. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126, 5215–5225. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11460-8>
8. Shalevska, I. A., Kaliuzhnyi, P. B., Pohrebach, E. V. (2021). Vykorystannja komp'juternogo modeljuvannja dlja identyfikacii' defektiv, shho utvorjuyut'sja u stalevyh vylyvkah korpusiv zapirnoi' armatury pry lytti za modeljamy, shho gazyfikujut'sja [Using computer simulation to identify defects formation in steel castings of shut-off valves casted with lost foam process]. *Casting processes*, 3, 53–60. doi: <https://doi.org/10.15407/plit2021.03.053>
9. Huang, J., Lin, Y. X., Chen, W. P., Qi, X. J. (2021). Numerical analysis of lost foam casting for large-caliber water meter shell. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(6). doi: <https://doi.org/10.1177/16878140211028059>
10. Li, F., Zhao, H., Ren, F., Song, S., Shao, X., Volinsky, A. A. (2020). Simulations and experiments of mould filling in lost foam casting. *International Journal of Cast Metals Research*, 33(4–5), 194–200. doi: <https://doi.org/10.1080/13640461.2020.1822572>
11. FLOW-3D CAST. Available at: <https://www.flow3d.com/>
12. Ozerov, V. A., Shulyak, V. S., Plotnikov, G. A. (1970). Lit'e po modeljam iz penopolistirola [Casting from polystyrene foam models]. Moscow: Mashinostroenie, 183.
13. Stepanov, Yu. A. ed. (1976). Lit'e po gazyficiruemym modeljam [Casting using gasified models]. Moscow: Mashinostroenie, 224.
14. Jeon, J. M., Lee, S. J., Choe, K. H., Huh, J. S. (2020). Gas Pressure Effect on Sand Collapse in Kinetic Zone of Lost-Foam Casting. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/5861017>
15. Kaczorowski, R., Pacyniak, T., Just, P. (2013). Test bench for analyzing the Lost Foam Process. *Archives of Foundry Engineering*, 13(1), 57–62. doi: [10.2478/afe-2013-0011](https://doi.org/10.2478/afe-2013-0011)