

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ  
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ДЬЯЧЕНКО МАКСИМ МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 621.74.045:669.13/.14:669.017

**ДИСЕРТАЦІЯ**

ТЕХНОЛОГІЯ ОДЕРЖАННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ  
СПЛАВІВ З НЕМЕТАЛЕВИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ ЗА МОДЕЛЯМИ,  
ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ

Спеціальність 136 – Металургія

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ М. М. Дьяченко

Науковий керівник – Шалевська Інна Анатоліївна, д. т. н.

Київ – 2026

## АНОТАЦІЯ

Дьяченко М. М. Технологія одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з неметалевими наповнювачами за моделями, що газифікуються. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 «Металургія» галузі знань 13 «Механічна інженерія». — Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, Київ, 2026.

Дисертацію присвячено розробленню технології одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з інтегрованими неметалевими наповнювачами за моделями, що газифікуються. У роботі бінарний виливок розглянуто як систему «металева оболонка - неметалевий наповнювач – перехідний шар», у якій кожна складова має визначене функціональне призначення. Металева оболонка із сірого чавуну СЧ200 або сталі 35Л виконує роль зовнішнього силового каркаса, а неметалевий наповнювач частково заміщує металевий об'єм і може працювати як внутрішнє опорне або енергопоглинальне середовище. Перехідна зона між металом і наповнювачем є важливою складовою бінарного виливка, від стану якої залежить цілісність системи після заливання, охолодження та подальшого механічного впливу.

Актуальність роботи зумовлена потребою у створенні литих виробів зі зменшеною металомісткістю при збереженні їх конструкційної цілісності та працездатності. У традиційних суцільнолитих виробах значна частина металу може виконувати переважно заповнювальну функцію, що збільшує масу, витрати розплаву, енергетичні витрати та екологічне навантаження ливарного виробництва. Одним із напрямів вирішення цієї проблеми є формування виливків, у яких частина внутрішнього металевого об'єму заміщується неметалевим наповнювачем. Практична реалізація такого підходу потребує стабільного положення наповнювача в моделі та формі, збереження його

цілісності під час заливання, формування контакту з металевою оболонкою та вибору параметрів, за яких утворюється цілісна бінарна система.

Метою роботи є розроблення технологічних підходів до одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з інтегрованими неметалевими наповнювачами за моделями, що газифікуються, та перевірка здатності запропонованої технології забезпечувати формування металевої оболонки, неметалевого наповнювача і перехідної зони між ними. Для досягнення цієї мети проаналізовано сучасний стан технологій одержання литих композиційних матеріалів і бінарних виливків, обґрунтовано вибір матеріалів металевої оболонки та неметалевого наповнювача, досліджено вплив складу рідкоскляної суміші на її поведінку після теплового впливу розплаву, розглянуто теплофізичні процеси в системі «метал — наповнювач», виконано експериментальну перевірку властивостей наповнювача в металевій оболонці та розроблено технологічну схему виготовлення дослідного сегмента бінарного модуля.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану технологій одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з неметалевими наповнювачами. Розглянуто місце таких виливків серед литих композиційних матеріалів, наведено характеристику системи «залізовуглецевий сплав — неметалевий наповнювач» та визначено можливі функції наповнювачів у литому виробі. Показано, що неметалевий компонент може виконувати не лише роль замітника частини металевого об'єму, а й функцію внутрішнього опорного середовища, теплоізоляційного, енергопоглинального або спеціального функціонального елемента. Окремо підкреслено відмінність досліджуваної системи від класичних дисперсно-армованих литих композиційних матеріалів: наповнювач не вводиться в розплав у вигляді окремих частинок, а попередньо формується всередині пінополістиролової моделі та після заливання залишається інтегрованим у виливок.

Проаналізовано основні ливарні методи, які можуть бути використані для одержання композиційних або бінарних литих систем: механічне перемішування розплаву з неметалевими частинками, просочення пористих преформ металом, відцентрове лиття, лиття з локальним розміщенням вставок і лиття за моделями, що газифікуються. Встановлено, що більшість традиційних способів має обмеження для формування виробів типу «оболонка - наповнювач», пов'язані з рівномірністю розподілу частинок, змочуванням, стабільністю суспензії, повнотою просочення преформ або фіксацією локальних елементів у формі. Обґрунтовано, що лиття за моделями, що газифікуються, є найбільш придатним для реалізації досліджуваної схеми, оскільки дає змогу попередньо розмістити наповнювач у моделі, сформувати потрібну геометрію внутрішнього об'єму та одержати бінарний виливок без додаткових операцій складання після лиття.

У другому розділі наведено методологію, матеріали та обладнання, використані у роботі. Як матеріали металевої оболонки обрано сірий чавун СЧ200 та сталь 35Л. Сірий чавун розглянуто як основний матеріал завдяки його ливарним властивостям, а сталь 35Л використано як порівняльний матеріал для оцінювання застосовності підходу до сплаву з вищою температурою заливання. Основним неметалевим наповнювачем була рідкоскляна суміш на основі кварцового піску та натрієвого рідкого скла. Такий наповнювач обрано з урахуванням його доступності, технологічності, здатності до ущільнення в порожнині моделі та можливості зміцнення після високотемпературного впливу.

Описано підготовку пінополістиролових моделей із внутрішньою порожниною, заповнення цієї порожнини рідкоскляною сумішшю, ущільнення наповнювача, нанесення протипригарного покриття на зовнішню поверхню моделі, складання модельних блоків, формування у сухому кварцовому піску та вакуумування форми перед заливанням. Важливою особливістю методики є те, що неметалевий наповнювач розміщується в

моделі до заливання металу, тобто його положення визначається геометрією пінополістиролової заготовки. Це дає змогу уникнути перемішування наповнювача з розплавом і забезпечити формування внутрішнього неметалевого об'єму заданої конфігурації. Наведено методики визначення роботи пробивання наповнювача, підготовки металографічних шліфів, дослідження мікроструктури металевої оболонки, вимірювання мікротвердості та оцінювання товщини перехідного шару.

У третьому розділі розглянуто теплофізичні процеси, які відбуваються під час формування виливка з інтегрованим неметалевим наповнювачем. Процес супроводжується надходженням теплоти від розплаву, газифікацією пінополістиролової моделі, прогріванням наповнювача, видаленням вологи та зв'язаної води з рідкоскляної суміші, поліконденсацією рідкого скла, спіканням силікатної складової та формуванням контактної зони на межі поділу фаз. Показано, що температурний стан наповнювача має вирішальне значення для його подальшої міцності та здатності залишатися в металевій оболонці після охолодження. Якщо наповнювач не набуває достатньої міцності, він може викришуватися з порожнини виливка; якщо ж тепловий вплив забезпечує зміцнення рідкоскляної суміші, формується більш стабільна система «металева оболонка – неметалевий наповнювач».

У розділі також розглянуто можливі фізико-хімічні процеси в контактній зоні. Теоретичний аналіз взаємодії оксидів заліза і марганцю з кремнеземною складовою наповнювача свідчить про можливість утворення силікатних сполук, зокрема  $\text{FeSiO}_3$  та  $\text{MnSiO}_3$ . Такі сполуки можуть формуватися в зоні контакту металу з рідкоскляною сумішшю та брати участь у зміцненні перехідного шару. Це дало змогу обґрунтувати необхідність вибору технологічних параметрів, за яких одночасно забезпечуються заповнення форми металом, збереження наповнювача та формування перехідної зони.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень виливків із рідкоскляним наповнювачем. Основну увагу приділено оцінюванню опору наповнювача механічному руйнуванню після заливання металом. Для цього використано методику визначення роботи пробивання, яка дала змогу кількісно порівняти стан рідкоскляної суміші залежно від вмісту рідкого скла та матеріалу металевої оболонки. Встановлено, що за низького вмісту рідкого скла наповнювач після теплового впливу має недостатню міцність, легко руйнується і може втрачати цілісність. Зі збільшенням вмісту рідкого скла робота пробивання зростає, що свідчить про підвищення опору наповнювача руйнуванню та кращу його фіксацію в металевій оболонці. Це пояснюється формуванням більш розвиненої силікатної зв'язувальної фази між зернами кварцового піску після нагрівання та охолодження.

Дослідження товщини перехідного шару показало, що на межі між металом і рідкоскляним наповнювачем формується зона взаємодії, яка відрізняється від основного металу та від об'єму наповнювача. Металографічні дослідження чавунних зразків показали, що інтегрування рідкоскляного наповнювача не призводить до порушення суцільності металевої оболонки. У контактній зоні виявлено особливості структури, пов'язані з локальними умовами охолодження та взаємодією металу з неметалевою складовою. Вимірювання мікротвердості дало змогу оцінити локальні зміни властивостей металевої оболонки поблизу межі з наповнювачем. Одержані результати підтвердили можливість формування цілісного бінарного виливка, у якому неметалевий наповнювач інтегрується у внутрішній об'єм виливка.

У п'ятому розділі розроблено та перевірено технологію виготовлення виливків із інтегрованим неметалевим наповнювачем. Запропонована технологічна схема включає виготовлення пінополістиролової моделі з внутрішньою порожниною, підготовку та ущільнення рідкоскляної суміші, складання модельного блока, нанесення протипригарного покриття,

формування у сухому кварцовому піску, вакуумування, заливання металу, охолодження, вибивання та контроль якості готового виливка. Така послідовність забезпечує фіксоване положення наповнювача до моменту заливання, стабільне формоутворення металевої оболонки та можливість формування перехідної зони під час теплової взаємодії металу з рідкоскляною сумішшю.

Проведено дослідну перевірку повного технологічного циклу на прикладі виготовлення сегмента бінарного модуля. Показано, що запропонована схема дає змогу одержати виливок із чітко сформованою металевою оболонкою, внутрішнім неметалевим наповнювачем і перехідним шаром між ними. Після вибивання та очищення виливків встановлено, що наповнювач зберігає положення в оболонці, а його стан залежить від складу суміші та режиму теплового впливу. Технологічна перевірка підтвердила можливість використання лиття за моделями, що газифікуються, для формування виробів типу «металева оболонка - неметалевий наповнювач».

Відповідно, у дисертаційній роботі послідовно вирішено комплекс питань, пов'язаних із теоретичним обґрунтуванням, експериментальним дослідженням і технологічною перевіркою одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з інтегрованими неметалевими наповнювачами. Результати роботи підтверджують можливість формування бінарних виливків за моделями, що газифікуються, за умови раціонального вибору матеріалу оболонки, складу рідкоскляного наповнювача та режимів заливання. Встановлено, що рідкоскляна суміш на основі кварцового піску після дії тепла розплаву може набувати достатньої міцності для збереження цілісності в металевій оболонці, а на межі «метал – неметалевий наповнювач» формується перехідний шар, який забезпечує зв'язок між складовими виливка.

**Ключові слова:** лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), чавун, сталь, наповнювач, рідке скло, лиття, композиційні матеріали, температура,

твердість, моделювання, тепломасообмін, екологія, структура, мікроструктура.

## ABSTRACT

Diachenko M. M. Technology for producing castings from iron-carbon alloys with nonmetallic fillers by lost-foam casting. — Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 136 “Metallurgy”, field of knowledge 13 “Mechanical Engineering”. — Physical-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development and verification of a technology for producing castings from iron-carbon alloys with integrated nonmetallic fillers by lost-foam casting. In this work, a binary casting is considered as a system consisting of a “metal shell - nonmetallic filler - transition layer”, in which each component has a defined functional purpose. The metal shell made of SCh200 gray cast iron or 35L steel serves as an external load-bearing framework, while the nonmetallic filler partially replaces the metal volume and may act as an internal supporting or energy-absorbing medium. The transition zone between the metal and the filler is an important component of the binary casting, since the integrity of the system after pouring, cooling, and subsequent mechanical loading depends on its condition.

The relevance of the work is determined by the need to create cast products with reduced metal consumption while maintaining their structural integrity and serviceability. In traditional solid cast products, a considerable part of the metal may mainly perform a filling function, which increases the mass of the casting, the consumption of molten metal, energy costs, and the environmental load of foundry production. One way to solve this problem is to form castings in which part of the internal metal volume is replaced by a nonmetallic filler. The practical implementation of this approach requires a stable position of the filler in the pattern and mold, preservation of its integrity during pouring, formation of contact with the

metal shell, and selection of parameters under which an integral binary system is formed.

The aim of the work is to develop technological approaches to producing castings from iron-carbon alloys with integrated nonmetallic fillers by lost-foam casting and to verify the ability of the proposed technology to ensure the formation of a metal shell, a nonmetallic filler, and a transition zone between them. To achieve this aim, the current state of technologies for producing cast composite materials and binary castings was analyzed; the choice of materials for the metal shell and nonmetallic filler was substantiated; the influence of the composition of the liquid-glass mixture on its behavior after thermal exposure to the melt was investigated; thermophysical processes in the “metal - filler” system were considered; experimental verification of the properties of the filler in the metal shell was carried out; and a technological scheme for manufacturing an experimental segment of a binary module was developed.

The first chapter analyzes the current state of technologies for producing castings from iron-carbon alloys with nonmetallic fillers. The place of such castings among cast composite materials is considered, the system “iron-carbon alloy - nonmetallic filler” is characterized, and the possible functions of fillers in a cast product are identified. It is shown that the nonmetallic component may perform not only the role of a substitute for part of the metal volume, but also the function of an internal supporting medium, a heat-insulating, energy-absorbing, or special functional element. The difference between the studied system and classical dispersion-reinforced cast composite materials is emphasized separately: the filler is not introduced into the melt in the form of individual particles, but is pre-formed inside the polystyrene foam pattern and remains integrated into the casting after pouring.

The main casting methods that can be used to produce composite or binary cast systems are analyzed: mechanical stirring of the melt with nonmetallic particles, infiltration of porous preforms with metal, centrifugal casting, casting with local

placement of inserts, and lost-foam casting. It is established that most traditional methods have limitations in forming products of the “shell - filler” type. These limitations are associated with the uniformity of particle distribution, wetting, suspension stability, completeness of preform infiltration, or fixation of local elements in the mold. It is substantiated that lost-foam casting is the most suitable method for implementing the studied scheme, since it allows the filler to be placed in the pattern in advance, the required geometry of the internal volume to be formed, and a binary casting to be obtained without additional assembly operations after casting.

The second chapter presents the methodology, materials, and equipment used in the work. SCh200 gray cast iron and 35L steel were selected as materials for the metal shell. Gray cast iron was considered as the main material due to its casting properties, while 35L steel was used as a comparative material to assess the applicability of the approach to an alloy with a higher pouring temperature. The main nonmetallic filler was a liquid-glass mixture based on quartz sand and sodium silicate. This filler was selected with regard to its availability, manufacturability, ability to be compacted in the pattern cavity, and potential for strengthening after high-temperature exposure.

The preparation of polystyrene foam patterns with an internal cavity, filling of this cavity with a liquid-glass mixture, compaction of the filler, application of an anti-burn-on coating to the outer surface of the pattern, assembly of pattern clusters, molding in dry quartz sand, and vacuuming of the mold before pouring are described. An important feature of the methodology is that the nonmetallic filler is placed in the pattern before metal pouring; that is, its position is determined by the geometry of the polystyrene foam pattern. This makes it possible to avoid mixing of the filler with the melt and to ensure the formation of an internal nonmetallic volume of a specified configuration. The methods for determining the punching work of the filler, preparing metallographic specimens, studying the microstructure of the metal

shell, measuring microhardness, and assessing the thickness of the transition layer are presented.

The third chapter considers the thermophysical processes that occur during the formation of a casting with an integrated nonmetallic filler. The process is accompanied by heat transfer from the melt, gasification of the polystyrene foam pattern, heating of the filler, removal of moisture and bound water from the liquid-glass mixture, polycondensation of liquid glass, sintering of the silicate component, and formation of a contact zone at the phase boundary. It is shown that the temperature state of the filler is of decisive importance for its subsequent strength and ability to remain in the metal shell after cooling. If the filler does not acquire sufficient strength, it may crumble out of the casting cavity; however, if thermal exposure ensures strengthening of the liquid-glass mixture, a more stable “metal shell - nonmetallic filler” system is formed.

The chapter also considers possible physicochemical processes in the contact zone. Theoretical analysis of the interaction of iron and manganese oxides with the silica component of the filler indicates the possibility of forming silicate compounds, in particular  $\text{FeSiO}_3$  and  $\text{MnSiO}_3$ . Such compounds may form in the zone of contact between the metal and the liquid-glass mixture and may participate in strengthening the transition layer. This made it possible to substantiate the need to select technological parameters under which mold filling with metal, preservation of the filler, and formation of the transition zone are ensured simultaneously.

The fourth chapter presents the results of experimental studies of castings with a liquid-glass filler. The main attention is paid to evaluating the resistance of the filler to mechanical failure after metal pouring. For this purpose, a method for determining punching work was used, which made it possible to quantitatively compare the condition of the liquid-glass mixture depending on the content of liquid glass and the material of the metal shell. It was established that, at a low liquid-glass content, the filler after thermal exposure has insufficient strength, is easily destroyed, and may lose integrity. With an increase in the liquid-glass content, the

punching work increases, indicating higher resistance of the filler to fracture and better fixation in the metal shell. This is explained by the formation of a more developed silicate bonding phase between quartz sand grains after heating and cooling.

Investigation of the transition layer thickness showed that an interaction zone forms at the boundary between the metal and the liquid-glass filler. This zone differs from both the base metal and the filler volume. Metallographic studies of cast-iron specimens showed that the integration of the liquid-glass filler does not lead to a loss of continuity of the metal shell. Structural features associated with local cooling conditions and the interaction of the metal with the nonmetallic component were found in the contact zone. Microhardness measurements made it possible to assess local changes in the properties of the metal shell near the boundary with the filler. The obtained results confirmed the possibility of forming an integral binary casting in which the nonmetallic filler is integrated into the internal volume of the casting.

The fifth chapter develops and verifies the technology for producing castings with an integrated nonmetallic filler. The proposed technological scheme includes manufacturing a polystyrene foam pattern with an internal cavity, preparing and compacting the liquid-glass mixture, assembling the pattern cluster, applying an anti-burn-on coating, molding in dry quartz sand, vacuuming, pouring the metal, cooling, shakeout, and quality control of the finished casting. This sequence ensures a fixed position of the filler before pouring, stable formation of the metal shell, and the possibility of forming a transition zone during the thermal interaction between the metal and the liquid-glass mixture.

Experimental verification of the complete technological cycle was carried out using the example of manufacturing a segment of a binary module. It is shown that the proposed scheme makes it possible to obtain a casting with a clearly formed metal shell, an internal nonmetallic filler, and a transition layer between them. After shakeout and cleaning of the castings, it was established that the filler retains its position in the shell, while its condition depends on the composition of the mixture

and the thermal exposure regime. The technological verification confirmed the possibility of using lost-foam casting to form products of the “metal shell - nonmetallic filler” type.

Thus, the dissertation consistently solves a set of issues related to the theoretical substantiation, experimental study, and technological verification of producing castings from iron-carbon alloys with integrated nonmetallic fillers. The results of the work confirm the possibility of forming binary castings by lost-foam casting, provided that the shell material, the composition of the liquid-glass filler, and the pouring conditions are rationally selected. It was established that a liquid-glass mixture based on quartz sand can acquire sufficient strength after exposure to the heat of the melt to preserve its integrity in the metal shell, while a transition layer forms at the “metal - nonmetallic filler” boundary and ensures bonding between the components of the casting.

**Keywords:** lost-foam casting (LFC), cast iron, steel, filler, liquid glass, casting, composite materials, temperature, hardness, modeling, heat and mass transfer, ecology, structure, microstructure.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у журналах, що включені до переліку фахових видань України

1. Дорошенко В. С., Калюжний П. Б., Дьяченко М. М. Лиття за газопроникними полімерними моделями, що газифікуються з відкачуванням по вентканалах газів із робочої порожнини форми. *Процеси лиття*. 2024. № 2 (156). С. 19–28. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.019>

Особистий внесок кожного автора: Дорошенко В. С. - обґрунтування технологічної схеми та аналіз газового режиму форми; Калюжний П. Б. - участь у розробленні технологічних положень ЛГМ-процесу та узагальненні результатів; Дьяченко М. М. - аналіз літературних джерел, опрацювання технологічних аспектів застосування ЛГМ-процесу та участь у підготовці матеріалів статті.

2. Тарасевич М. І., Шинський О. Й., Шалевська І. А., Корнієць І. В., Гнилокурченко С. В., Дьяченко М. М. Вплив діаметра та об'ємної частки армуючих елементів на формування композиційних виливків. *Метал та лиття України*. 2025. № 2 (341). С. 30–37.

<https://doi.org/10.15407/steelcast2025.02.030>

Особистий внесок кожного автора: Тарасевич М. І. - формування методичних підходів; Шинський О. Й. - участь у формуванні концепції дослідження та науковому аналізі результатів; Шалевська І. А. - аналіз технологічних особливостей формування композиційних виливків; Корнієць І. В. - участь у розробленні методики аналізу впливу геометричних параметрів армуючих елементів; Гнилокурченко С. В. - технічний супровід досліджень та оформлення графічних матеріалів; Дьяченко М. М. - участь в аналізі результатів, узагальненні положень і підготовці окремих фрагментів рукопису.

3. Дьяченко М. М., Корнієць І. В. Дослідження процесів формування перехідного шару на межі сірий чавун - інтегрований неметалевий наповнювач

при одержанні легковагових виливків. *Метал та лиття України*. 2025. № 3–4 (342–343). С. 119–130. <https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.119>

Особистий внесок кожного автора: Дьяченко М. М. - підготовка та виготовлення дослідних зразків, проведення експериментальних досліджень, аналіз формування перехідної зони, обробка результатів і підготовка основного тексту статті; Корнієць І. В. - математичне моделювання процесів формування перехідного шару, методичний супровід досліджень, інтерпретація результатів та наукове редагування рукопису.

4. Шалевська І. А., Дьяченко М. М. Зменшення викидів шкідливих речовин при виготовленні литих конструкцій із неметалевим наповнювачем. *Процеси лиття*. 2026. № 2 (164). С. 31–38.

<https://doi.org/10.15407/plit2026.02.031>

Особистий внесок кожного автора: Шалевська І. А. - розроблення підходу до оцінювання екологічного ефекту, виконання розрахунків та аналіз екологічних показників ЛГМ-процесу; Дьяченко М. М. - надання вихідних технологічних даних, участь в аналізі впливу зменшення металоємності на екологічні показники та підготовці тексту статті.

5. Дьяченко М. М., Калюжний П. Б., Шалевська І. А., Гнилокурченко С. В., Овсянников В. О. Визначення впливу вмісту рідкого скла в наповнювачі чавунних і сталевих литих модулів на показники стійкості до пробивання. *Метал та лиття України*. 2026. № 2 (345). С. 8–17.

<https://doi.org/10.15407/steelcast2026.02.008>

Особистий внесок кожного автора: Дьяченко М. М. - постановка експериментального завдання, підготовка наповнювачів і дослідних зразків, проведення випробувань на пробивання, аналіз результатів і підготовка основного тексту статті; Калюжний П. Б. - участь у розробленні технологічної схеми виготовлення литих модулів та аналізі ливарно-технологічних параметрів; Шалевська І. А. - аналіз технологічної та практичної значущості отриманих результатів; Гнилокурченко С. В. - технічний супровід

експериментів, підготовка матеріалів і оформлення графічних даних; Овсянников В. О. - проведення мікроструктурних досліджень, обробка результатів і участь у підготовці матеріалів статті.

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

6. Технологічні аспекти виготовлення литих металевих сегментів з неметалевим армуванням для збірних захисних споруд. І.А. Шалевська, В.С. Дорошенко, М.М. Дьяченко. Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 12: збірник Міжнародної наукової конференції, Київ, 15–16 грудн. 2022. – Київ: НТУУ "КПІ", 2022, С. 70-73.

7. Особливості вибору дисперсних неметалевих матеріалів для армування литих металоконструкцій. І. А. Шалевська, В. С. Дорошенко, М. М. Дьяченко. Литво. Металургія. 2023: Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції (10-12 жовтня 2023 р., м. Харків-м. Київ) / Під заг. ред. Пономаренко О.І. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 224-227.

8. Механізм одержання композиційного виливка з сірого чавуна з використанням керамічних армуючих елементів. Шалевська І. А., Дьяченко М. М. Литво. Металургія. 2023: Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції (10-12 жовтня 2023 р., м. Харків-м. Київ) / Під заг. ред. Пономаренко О.І. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 227-229.

9. Про лиття з металу захисних споруд та ємностей. Калюжний П.Б., Дорошенко В.С., Дьяченко М.М., Янченко О.Б. Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2024» (25-26 квітня 2024 р., м. Київ), С. 204-206

10. Вплив масового співвідношення армуючої фази та матричного сплаву на формування армованого виливка. М. І. Тарасевич, О. Й. Шинський, І. В. Корнієць, І. А. Шалевська, О. І. Рибіцький, М. М. Дьяченко. Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції Литво 2024 XVII Міжнародної науково-практичної конференції Металургія 2024: (28-30 травня 2024 р., м. Київ), С. 245-248

11. Технології виготовлення виливків зі спеціальними властивостями. І.А. Шалевська, М. М. Дьяченко. Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції Литво 2024 XVII Міжнародної науково-практичної конференції Металургія 2024: (28-30 травня 2024 р., м. Київ), С. 280-282.

12. Дослідження та моделювання процесів формування композиційних виливків. Дьяченко М. М., Шалевська І. А., Корнієць І. В., Гнилокурєнко С.В. Матеріали X науково практичної конференції молодих вчених України: «МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ, ПРОЦЕСИ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ» (9 вересня 2025 року, м. Київ), С. 13-16.

13. Оцінка пробиваємості рідкоскляних сумішей як наповнювача литих модулів. Калюжний П. Б., Дьяченко М. М. Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2025: (25-26 вересня 2025 р., м. Київ), С. 295-297.

14. Дослідження формування перехідного шару в системі "метал-неметалевий наповнювач". М.М. Дьяченко, І.А. Шалевська, І.В. Корнієць, С.В.Гнилокурєнко, І.А.Небожак. Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві»: (21-23 жовтня 2025 року, Краматорськ-Тернопіль).

**Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

15. Акт дослідно-промислової перевірки технології виготовлення легковагових литих сегментів захисних модулів із чавуну СЧ200 та сталі 35Л з інтегрованим рідкоскляним наповнювачем методом ЛГМ. ПП «Відікаст», 15.04.2026 р.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....</b>                                                                                    | <b>22</b> |
| <b>ВСТУП .....</b>                                                                                                       | <b>24</b> |
| <b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ<br/>ОДЕРЖАННЯ ЛИТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ<br/>МАТЕРІАЛІВ.....</b>                 | <b>35</b> |
| 1.1 Виливки із залізовуглецевих сплавів з неметалевими<br>наповнювачами: класифікація та функціональне призначення ..... | 35        |
| 1.2 Ливарні методи одержання виливків із залізовуглецевих сплавів<br>з неметалевими наповнювачами.....                   | 39        |
| 1.3 Визначення невирішених питань та обґрунтування наряду<br>дослідження.....                                            | 47        |
| Висновки до розділу 1.....                                                                                               | 53        |
| <b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ..</b>                                                                  | <b>55</b> |
| 2.1 Вибір матеріалів та їх характеристики.....                                                                           | 55        |
| 2.2 Методика виготовлення дослідних зразків із рідкоскляним<br>наповнювачем.....                                         | 59        |
| 2.3 Методика визначення роботи пробивання рідкоскляного<br>наповнювача в дослідних зразках.....                          | 62        |
| 2.4 Методика вимірювання товщини перехідного шару.....                                                                   | 63        |
| 2.5 Методика проведення металографічного аналізу.....                                                                    | 64        |
| 2.6 Методика визначення мікротвердості металеві оболонки.....                                                            | 65        |
| 2.7 Методика випробувань на стиск.....                                                                                   | 67        |
| 2.8 Методика термоконтролю процесу прогрівання рідкоскляного<br>наповнювача.....                                         | 69        |
| 2.9 Допоміжні інструменти обробки текстової інформації.....                                                              | 72        |
| Висновки до розділу 2.....                                                                                               | 72        |

|                                                                                                                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ<br/>ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....</b>                                                                                                   | <b>74</b>  |
| 3.1 Передумови формування перехідного шару та збереження<br>міцності неметалевого наповнювача.....                                                                        | 74         |
| 3.2 Математична модель тепломасообмінних процесів.....                                                                                                                    | 80         |
| 3.3 Результати математичного та комп'ютерного моделювання<br>теплових процесів.....                                                                                       | 85         |
| 3.4 Порівняння результатів математичного моделювання з<br>експериментальними даними та визначення температурно-часових<br>умов для термічного зміцнення наповнювача ..... | 88         |
| Висновки до розділу 3.....                                                                                                                                                | 92         |
| <b>РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>                                                                                                                        | <b>95</b>  |
| 4.1 Результати визначення роботи пробивання.....                                                                                                                          | 95         |
| 4.2 Визначення товщини перехідного шару.....                                                                                                                              | 98         |
| 4.3 Мікроструктура перехідного шару та мікротвердість чавунної<br>оболонки.....                                                                                           | 101        |
| 4.4 Результати випробування зразків на стиск.....                                                                                                                         | 104        |
| Висновки до розділу 4.....                                                                                                                                                | 106        |
| <b>РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ПЕРЕВІРКА ТЕХНОЛОГІЇ<br/>ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ ІНТЕГРОВАНИМ<br/>НЕМЕТАЛЕВИМ НАПОВНЮВАЧЕМ .....</b>                                         | <b>108</b> |
| 5.1 Передумови розроблення технології виготовлення бінарних<br>виливків.....                                                                                              | 108        |
| 5.2 Технологічна схема виготовлення виливків з інтегрованими<br>неметалевими наповнювачами.....                                                                           | 109        |
| 5.3 Перевірка технології виготовлення сегмента бінарного модуля...                                                                                                        | 112        |
| 5.4 Оцінка техніко-екологічного ефекту виготовлення виливків із<br>інтегрованим неметалевим наповнювачем.....                                                             | 116        |

|                                                                                                        |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5. Технологічні рекомендації щодо виготовлення бінарних<br>виливків із неметалевим наповнювачем..... | 128        |
| Висновки до розділу 5.....                                                                             | 132        |
| <b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>                                                                          | <b>135</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>                                                                 | <b>139</b> |
| <b>ДОДАТКИ .....</b>                                                                                   | <b>150</b> |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ЛГМ — лиття за моделями, що газифікуються;
- ППС — пінополістирол;
- РСС — рідкоскляна суміш;
- ЛКМ — литі композиційні матеріали;
- СЧ200 — сірий чавун марки СЧ200;
- ВЧ 350-22 — високоміцний чавун із кулястим графітом марки ВЧ 350-22;
- 35Л — сталь ливарна марки 35Л;
- ДСТУ — національний стандарт України;
- ПМТ-3 — прилад для вимірювання мікротвердості;
- HV — твердість за Віккерсом;
- HV0,1 — мікротвердість за Віккерсом за навантаження 0,1 кгс;
- Апр — робота пробивання зразка, Дж;
- P — навантаження, зусилля, Н;
- P<sub>max</sub> — максимальне навантаження під час випробування, Н;
- F — площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup>;
- $\sigma$  — напруження або поверхневий натяг, Па; Н/м;
- $\rho$  — густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;
- m — маса, кг;
- V — об'єм, м<sup>3</sup>;
- D — зовнішній діаметр зразка, мм;
- d — внутрішній діаметр зразка, мм;
- $\delta$  — товщина металевої оболонки або перехідного шару, мм;
- h — висота зразка або глибина проникнення розплаву, мм;
- r — радіус капіляра або порового каналу, м;
- R — радіус зразка, м;
- t — температура, °C;
- T — термодинамічна температура, К;
- $\tau$  — час, с;

$\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

$c$  — питома теплоємність, Дж/(кг·К);

$a$  — коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

$\alpha$  — коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$Bi$  — критерій Біо;

$Fo$  — критерій Фур'є;

$\mu$  — динамічна в'язкість розплаву, Па·с;

$k$  — коефіцієнт проникності пористого середовища, м<sup>2</sup>;

$\theta$  — крайовий кут змочування, град;

$g$  — прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\Delta p$  — перепад тиску, Па;

$\Delta G^\circ$  — стандартна зміна енергії Гіббса, кДж/моль;

$SiO_2$  — діоксид кремнію;

$Na_2O$  — оксид натрію;

$FeO$  — оксид заліза(II);

$MnO$  — оксид мангану(II);

$FeSiO_3$  — силікат заліза, феросиліт;

$MnSiO_3$  — силікат мангану, родоніт;

$Na_2SiO_3$  — силікат натрію;

$C$  — вуглець;

$Si$  — кремній;

$Mn$  — манган;

$Fe$  — залізо;

Валовий викид, суцільнолит. варіант, т/рік - валовий викид, суцільнолитий варіант, т/рік;

Очік. зменш. викиду, т/рік - очікуване зменшення викиду, т/рік;

Прогноз. викид, бін. вил., т/рік - Прогнозований викид, бінарний виливок, т/рік.

## ВСТУП

### Обґрунтування вибору теми дослідження

Сучасний розвиток ливарного виробництва пов'язаний із необхідністю створення нових типів виливків, які поєднують знижену металоємність, достатню механічну міцність, підвищену енергоємність руйнування та можливість роботи в умовах інтенсивного механічного, теплового або ударного навантаження. Особливої актуальності набуває розроблення литих конструкцій, у яких функціональні властивості визначаються не лише металевою складовою, а й цілеспрямованим поєднанням металевої оболонки з неметалевим внутрішнім наповнювачем.

Традиційні суцільнолиті вироби із залізовуглецевих сплавів характеризуються високою несучою здатністю, однак їх застосування часто супроводжується значною масою, підвищеною витратою металу та енергоресурсів, а також збільшенням екологічного навантаження на виробництво. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є створення бінарних литих конструкцій типу «металева оболонка - неметалевий наповнювач», у яких частина металевого об'єму заміщується функціональною неметалевою фазою. За такого підходу металева оболонка виконує роль зовнішнього силового каркаса, а наповнювач забезпечує зниження маси, поглинання енергії ударного впливу, протидію локальному руйнуванню та формування необхідних експлуатаційних властивостей виробу.

У відомих технологіях одержання литих композиційних матеріалів широко застосовуються методи механічного введення дисперсних частинок у розплав, просочення пористих преформ, відцентрове лиття, використання локальних вставок або армувальних елементів. Водночас ці методи мають істотні обмеження для формування виливків із внутрішнім неметалевим об'ємом, який повинен зберігати цілісність під час заливання, витримувати

тепловий удар розплаву, забезпечувати контакт із металевою оболонкою та після охолодження брати участь у роботі всієї конструкції.

Найбільш технологічно придатним для створення таких виливків є лиття за моделями, що газифікуються. Цей процес дає змогу попередньо розмістити неметалевий наповнювач у пінополістироловій моделі та сформувати виливок із заданою внутрішньою будовою без складних стрижневих систем. Разом з тим застосування ЛГМ-процесу для одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з інтегрованими неметалевими наповнювачами потребує наукового обґрунтування. Недостатньо дослідженими залишаються питання тепломасообміну в системі «розплав - наповнювач - ливарна форма», формування перехідної зони на межі «метал - неметалевий наповнювач», впливу складу рідкоскляної суміші на її міцність після теплового впливу розплаву, а також технологічні умови виготовлення таких виливків за ЛГМ-процесом.

Таким чином, актуальним науково-практичним завданням є розроблення та обґрунтування технології одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з інтегрованими неметалевими наповнювачами за моделями, що газифікуються, з урахуванням теплових, фізико-хімічних і технологічних процесів, які відбуваються під час заливання, твердіння та охолодження виливка.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою дисертаційної роботи є розроблення та наукове обґрунтування технології одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з інтегрованими неметалевими наповнювачами за моделями, що газифікуються, шляхом встановлення закономірностей тепломасообміну, формування перехідної зони та зміцнення рідкоскляного наповнювача після теплового впливу розплаву.

Об'єкт дослідження: процес одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з інтегрованими неметалевими наповнювачами методом лиття за моделями, що газифікуються.

Предмет дослідження: закономірності тепломасообмінних процесів, формування перехідної зони на межі «металева оболонка - неметалевий наповнювач», а також вплив складу рідкоскляного наповнювача на його здатність протидіяти руйнуванню після теплового впливу розплаву.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз вітчизняних і закордонних літературних джерел щодо одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з неметалевими наповнювачами.
2. Обґрунтувати вибір неметалевої фази для внутрішнього наповнення виливка та визначити її вид, склад і основні властивості.
3. Визначити передумови та обґрунтувати технологічний механізм одержання виливка із сірого чавуну з інтегрованим рідкоскляним неметалевим наповнювачем.
4. Розробити фізичну і математичну моделі процесів твердіння та охолодження виливка з неметалевою фазою.
5. Встановити закономірності тепломасообмінних процесів у ливарній формі при використанні неметалевого наповнювача із застосуванням математичного та комп'ютерного моделювання.
6. Розробити технологічні підходи до виготовлення виливків із неметалевою фазою методом лиття за моделями, що газифікуються.
7. Виготовити дослідні зразки виливків із неметалевим наповнювачем.
8. Перевірити на дослідних зразках особливості формування перехідної зони на межі «матричний сплав — неметалева фаза» та оцінити опір руйнуванню рідкоскляного наповнювача після теплового впливу розплаву за показником роботи пробивання.

### **Методи дослідження**

Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплекс аналітичних, теоретичних, розрахункових, експериментальних і технологічних методів дослідження.

Аналітичний метод використано для узагальнення сучасного стану досліджень у галузі литих композиційних матеріалів, виливків із залізобуглецевих сплавів з неметалевими наповнювачами, а також технологій лиття за моделями, що газифікуються. Це дало змогу визначити невирішені питання та обґрунтувати напрям дисертаційного дослідження.

Методи фізичного моделювання застосовано для відтворення умов формування виливків із металевою оболонкою та внутрішнім рідкоскляним наповнювачем. За їх допомогою досліджували особливості заповнення моделі наповнювачем, його ущільнення, взаємодію з розплавом і формування цілісної системи «оболонка - наповнювач».

Математичне та комп'ютерне моделювання використано для аналізу процесів твердіння й охолодження виливків із неметалевим наповнювачем. Розрахунок температурних полів і кінетики тверднення дав змогу оцінити характер тепломасообміну в системі «метал - наповнювач - форма» та визначити вплив теплофізичних властивостей наповнювача на формування виливка.

Термодинамічний аналіз застосовано для оцінювання ймовірності фізико-хімічної взаємодії між оксидами металу та кремнеземною складовою рідкоскляного наповнювача. Зокрема, розглядали можливість утворення силікатних фаз заліза та мангану, які можуть брати участь у зміцненні перехідної зони.

Експериментальні методи лиття за моделями, що газифікуються, використано для виготовлення дослідних зразків і перевірки працездатності запропонованих технологічних підходів. Під час досліджень застосовували пінополістиролові моделі з внутрішньою порожниною, рідкоскляні неметалеві

наповнювачі, сухий кварцовий пісок як формувальне середовище та вакуумування форми.

Метод термометричного контролю застосовано для експериментального визначення температурних режимів прогрівання наповнювача в процесі заливання та охолодження виливка. Це дало змогу зіставити результати експерименту з даними математичного моделювання.

Метод визначення роботи пробивання використано для кількісної оцінки опору рідкоскляного наповнювача руйнуванню після теплового впливу розплаву. За цим показником порівнювали різні склади наповнювачів залежно від вмісту рідкого скла.

Металографічний аналіз і вимірювання мікротвердості застосовано для дослідження структури металевої оболонки, перехідної зони та контактної області між металом і наповнювачем. Ці методи дали змогу оцінити вплив вмісту рідкого скла на формування перехідного шару та локальні властивості чавунної матриці.

Розрахунково-аналітичні методи використано для оцінювання технологічної ефективності запропонованих рішень, зокрема зниження металоємності, маси виливків, витрат рідкого металу та екологічного навантаження під час виготовлення бінарних литих конструкцій.

Обґрунтованість отриманих результатів забезпечується використанням взаємодоповнюваних теоретичних і експериментальних методів, зіставленням результатів математичного моделювання з експериментальними даними, застосуванням стандартних методик підготовки зразків і дослідження структури матеріалів, а також перевіркою запропонованих технологічних рішень на дослідних зразках.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Вперше науково обґрунтовано закономірності формування бінарних литих конструкцій типу «металева оболонка - інтегрований неметалевий функціональний наповнювач» із залізовуглецевих сплавів за моделями, що

газифікуються. Показано, що на відміну від традиційних монолітих або дисперсно-армованих виливків, у таких конструкціях металева оболонка, перехідний шар і неметалевий наповнювач виконують різні, але взаємопов'язані функції: оболонка забезпечує геометричну цілісність і сприйняття зовнішнього навантаження, перехідний шар - зв'язок між фазами, а наповнювач - зниження маси, сприйняття стискальних навантажень і протидію локальному проникненню.

2. Вперше розроблено оригінальну методику визначення залишкової міцності неметалевого функціонального наповнювача шляхом оцінки роботи пробивання (гальмування) рухомого тіла, що дозволило кількісно порівнювати різні склади та обґрунтовувати вибір наповнювача для захисних конструкцій і вперше експериментально встановити кількісні залежності роботи пробивання (гальмування) рухомого тіла:

- вміст рідкого скла в наповнювачі суттєво впливає на роботу пробивання: так, функціональна суміш з кварцового піску (вміст РС 4 - 8 %) в оболонці з СЧ200 та Сталь 35Л (РС 4 - 12 %) має низьку залишкову міцність і робота пробивання становить менше ніж 80 та 140 Дж відповідно. При вмісті РС 12 - 14% (для СЧ200) робота пробивання досягає величини 540...700 Дж, а при вмісті РС 14 - 16 % (для Сталі 35 Л) – 575...1200 Дж, тобто підвищується в 4...9 разів. За таких значень роботи гальмування суміш на кварцовому піску з РС реально протидіє пробиванню металевими частками, кінетична енергія яких при контакті з поверхнею наповнювача сталевого бінарного модуля знаходиться в межах 1500...2500 Дж, що дає змогу прогнозувати занурення металевого тіла в наповнювач на глибину 20...40 мм.

3. Вперше для технології ЛГМ методом обчислювального експерименту встановлено та експериментально підтверджено, що наявність у порожнистому виливку наповнювача визначає характер тепломасообміну в ливарній формі. Для РСС ( $\lambda = 2,58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) характерним є значний градієнт температури на межі поділу (до 150 °С) та повільний прогрів центральних зон

(оболонка твердне за 40 с, центр наповнювача досягає 880 °С через 4 хв), що сприяє глибокому капілярному просоченню (товщина перехідного шару 0,5 - 1,5 мм) та забезпечує вторинне спікання наповнювача по всьому об'єму.

4. Вперше розроблено та експериментально підтверджено математичну модель тепломасообміну у виливку із неметалевим наповнювачем на основі узагальненого рівняння теплопровідності в формі ентальпії з урахуванням фазових перетворень, неідеального теплового контакту на межі «метал - наповнювач» (з термічним опором  $R_c$ ) та конвективного переносу в рідкій фазі через ефективний коефіцієнт теплопровідності, що дозволяє прогнозувати температурні поля та кінетику тверднення виливка в умовах ЛГМ із похибкою близько 10 %.

5. Дістали подальшого розвитку науково-методичні засади одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з неметалевими наповнювачами, які враховують сумісний вплив температури на зміцнення наповнювача (ефект вторинного спікання) та усадкового тиску оболонки, що дозволило сформулювати критерії вибору матеріалу оболонки та складу наповнювача залежно від вимог до захисних та несучих конструкцій.

6. Вперше на основі термодинамічного аналізу (розрахунку енергії Гіббса) та мікроструктурних досліджень підтверджено ймовірність утворення силікатних фаз  $\text{FeSiO}_3$  ( $\Delta G^\circ \approx -60,4$  кДж/моль) та  $\text{MnSiO}_3$  ( $\Delta G^\circ \approx -245,6$  кДж/моль) на межі поділу «метал - наповнювач» при температурах заливання, що забезпечує додаткове зміцнення перехідного шару. Показано, що газовий тиск продуктів термодеструкції не перешкоджає формуванню якісного перехідного шару при оптимальних параметрах (вміст РС  $\geq 12$  %, вакуумування форми).

7. Вперше встановлено, що використання неметалевих наповнювачів замість суцільного металу дозволяє зменшити викиди шкідливих речовин при ЛГМ-процесі мінімум на 50 % (зокрема, викиди пилу скорочуються на  $\sim 20$  т/рік, СО – на  $\sim 3$  т/рік при річному обсязі виробництва 1000 т).

### **Практичне значення отриманих результатів**

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у розробленні технологічних підходів до виготовлення легковагих бінарних виливків із залізовуглецевих сплавів з інтегрованими неметалевими наповнювачами методом лиття за моделями, що газифікуються.

Запропонована технологічна схема дає змогу одержувати виливки типу «металева оболонка — неметалевий наповнювач», у яких внутрішній об'єм частково заміщується рідкоскляною сумішшю або іншим функціональним наповнювачем. Це забезпечує зниження маси виливків, скорочення витрат рідкого металу та створює передумови для виготовлення литих модулів захисного або несучого призначення.

Розроблена методика визначення роботи пробивання може бути використана для порівняльного оцінювання різних складів неметалевих наповнювачів після теплового впливу розплаву та вибору оптимального вмісту рідкого скла в рідкоскляній суміші. Встановлені залежності між складом наповнювача та його опором руйнуванню можуть бути використані під час проектування бінарних литих конструкцій, які працюють в умовах локального ударного або механічного навантаження.

Результати досліджень формування перехідної зони на межі «металева оболонка - неметалевий наповнювач» можуть бути застосовані для обґрунтування вибору матеріалу оболонки, складу наповнювача та режимів заливання. Запропоновані технологічні рекомендації враховують необхідність забезпечення контакту між металом і наповнювачем, формування перехідного шару та збереження цілісності внутрішньої неметалевої фази після заливання.

Розроблені фізична і математична моделі тепломасообмінних процесів можуть бути використані для прогнозування температурних полів, тривалості твердіння та умов прогрівання наповнювача у виливках із різними теплофізичними властивостями внутрішньої фази. Це дає змогу на етапі

проектування оцінювати технологічну придатність різних неметалевих наповнювачів та коригувати параметри ЛГМ-процесу.

Практичне використання результатів роботи можливе під час розроблення литих модульних елементів, огорожувальних конструкцій, захисних сегментів та інших виробів, для яких важливими є зниження маси, економія металу та підвищення здатності конструкції поглинати енергію локального впливу. Запропоновані технологічні рішення також сприяють зменшенню екологічного навантаження ливарного виробництва за рахунок зниження витрат металу та скорочення обсягу шкідливих викидів у процесі виготовлення виливків.

### **Особистий внесок здобувача**

Основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. Автором виконано аналіз літературних джерел за темою дослідження, обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет роботи, обґрунтовано вибір залізовуглецевих сплавів для металевої оболонки та рідкоскляної суміші як неметалевого функціонального наповнювача.

Здобувачем розроблено технологічні підходи до виготовлення дослідних зразків виливків із інтегрованим неметалевим наповнювачем за моделями, що газифікуються, підготовлено та виготовлено пінополістиролові моделі, здійснено підготовку наповнювачів, проведено лиття дослідних зразків і виконано їх подальше дослідження.

Автором проведено аналіз тепломасообмінних процесів у системі «металева оболонка - неметалевий наповнювач», взято участь у розробленні фізичної та математичної моделей процесів твердіння й охолодження виливка, виконано обробку та інтерпретацію результатів комп'ютерного моделювання й експериментальних досліджень.

Здобувачем виконано експериментальну оцінку роботи пробивання рідкоскляних наповнювачів, проведено аналіз впливу вмісту рідкого скла на

опір руйнуванню наповнювача, підготовлено зразки для металографічних досліджень, проаналізовано особливості формування перехідної зони та локальні зміни мікроструктури металевої оболонки.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать постановка окремих експериментальних завдань, підготовка дослідних зразків, участь у проведенні експериментів, обробка результатів, аналіз отриманих залежностей, формулювання основних висновків і підготовка матеріалів до публікації. Співавтори брали участь в обговоренні наукових результатів, консультаціях щодо методики досліджень та узагальненні окремих положень роботи.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та отримали позитивну оцінку на таких наукових конференціях та семінарах:

1. Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 12» (м. Київ, 15–16 грудня 2022 р.).
2. XIX Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія – 2023» (м. Харків – м. Київ, 10–12 жовтня 2023 р.).
3. XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2024» (м. Київ, 25–26 квітня 2024 р.).
4. XX Міжнародна науково-практична конференція «Литво – 2024» та XVII Міжнародна науково-практична конференція «Металургія – 2024» (м. Київ, 28–30 травня 2024 р.).
5. Науково-практична конференція молодих вчених України «Металеві матеріали, процеси виготовлення та перспективи їх застосування в промисловості України» (м. Київ, 9 вересня 2025 р.).
6. XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2025» (м. Київ, 25–26 вересня 2025 р.).

7. X Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ – м. Тернопіль, 21–23 жовтня 2025 р.).

### **Публікації**

За темою дисертаційної роботи опубліковано 5 статей у наукових фахових виданнях України та 9 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

### **Структура та обсяг дисертації**

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків.

Загальний обсяг дисертації становить 150 сторінок. Робота містить 26 рисунків, 12 таблиць, список використаних джерел із 98 найменувань та 1 додаток.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ ОДЕРЖАННЯ ЛИТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

### **1.1 Виливки із залізовуглецевих сплавів з неметалевими наповнювачами: класифікація та функціональне призначення**

Композиційні матеріали за природою матриці поділяють на полімерні, керамічні та металеві. Полімерні композити мають обмеження за термостійкістю, а керамічні, незважаючи на високу твердість і жаростійкість, схильні до крихкого руйнування. Тому в конструкціях, що потребують поєднання міцності, технологічності, надійності та здатності працювати в умовах механічного або теплового навантаження, перевагу часто надають металевим композитам, зокрема литим композиційним матеріалам [1–3].

Литі композиційні матеріали становлять окрему групу матеріалів, у яких формування виробу та поєднання його складових відбуваються безпосередньо під час ливарного процесу. Це дає змогу отримувати заготовки складної геометрії, поєднувати металеву основу з неметалевими компонентами та локально або об'ємно змінювати властивості виробу залежно від його функціонального призначення. На відміну від деформованих або порошкових композиційних матеріалів, литі системи формуються в умовах контакту розплаву з наповнювачем, тому їх властивості значною мірою залежать від змочування, теплової взаємодії, хімічної сумісності та характеру формування перехідної зони між складовими.

У межах цієї роботи найбільший інтерес становлять литі композиційні матеріали на основі залізовуглецевих сплавів, металева складова яких формується безпосередньо під час заливання розплаву, а неметалевий компонент вводиться у виливок у вигляді частинок, гранул, вставок, преформ або об'ємного наповнювача. Застосування залізовуглецевих сплавів, зокрема чавунів і сталей, у таких системах обґрунтоване їх доступністю, відпрацьованістю ливарних технологій, здатністю формувати вироби складної

конфігурації та можливістю взаємодії з оксидними, силікатними і карбідними неметалевими матеріалами [4, 5, 6–8]. Для виливків, у яких металева оболонка має сформуватися навколо попередньо розміщеного наповнювача, чавуни є привабливими завдяки високій рідкоплинності, добрій заповнюваності форми та помірній температурі заливання. Сталі доцільно застосовувати у випадках, коли металева оболонка повинна сприймати підвищені розтягувальні, згинальні або ударні навантаження [9, 10].

На відміну від класичних металоматричних композитів, у яких неметалева фаза переважно виконує роль армувальної складової та рівномірно розподіляється в об'ємі металевої матриці для її зміцнення, у розглядуваних виливках неметалевий компонент може займати локальну або об'ємну конструктивну зону і виконувати ширший спектр функцій. У таких системах доцільно застосовувати поняття «неметалевий наповнювач», оскільки його призначення не обмежується лише армуванням металевої матриці. Він може частково заміщувати металевий об'єм, зменшувати масу виробу, сприймати стискальні навантаження, поглинати енергію ударного впливу, виконувати теплоізоляційну функцію, локально підвищувати зносостійкість або брати участь у формуванні перехідної зони на межі з металевою оболонкою.

Таке трактування особливо важливе для виливків типу «металева оболонка - неметалевий наповнювач», у яких неметалевий компонент не є дрібнодисперсною добавкою до розплаву, а формується як окрема внутрішня частина виробу. У цьому випадку наповнювач не зміцнює металеву матрицю за класичною схемою дисперсного армування, а працює як самостійний функціональний елемент, пов'язаний із металевою оболонкою через контактну або перехідну зону. Тому для таких виливків важливими є не лише властивості металевого сплаву та наповнювача окремо, а й умови їх спільного формування під час заливання, твердіння та охолодження.

Серед неметалевих матеріалів, що можуть застосовуватися як наповнювачі в залізобетонних виливках, основну увагу приділено

силікатним композиціям, передусім сумішам на основі кварцового піску з натрієвим рідким склом. У традиційному ливарному виробництві такі суміші використовуються як формувальні та стрижневі матеріали. У запропонованій технології вони розглядаються не як тимчасовий елемент ливарної форми, що видаляється після вибивання, а як інтегрований функціональний наповнювач, який залишається у внутрішньому об'ємі виливка. Доцільність застосування таких силікатних композицій зумовлена їх доступністю, вогнетривкістю, можливістю формування зернового каркаса, здатністю до ущільнення в порожнині моделі та можливістю термічного зміцнення після контакту з розплавом [11, 12, 13–15].

Інші типи неметалевих матеріалів, зокрема оксидні наповнювачі на основі корунду або муліту, карбідні матеріали типу SiC чи WC, а також пористі мінеральні матеріали, такі як керамзит або перліт, можуть застосовуватися у випадках, коли пріоритетними є зносостійкість, жаростійкість, теплоізоляційні властивості або максимальне зниження маси виробу [4, 5, 7, 8]. Вибір конкретного типу наповнювача залежить від призначення виливка, температурних умов його виготовлення, характеру навантаження, вимог до маси, а також від можливості забезпечити стабільний контакт між металевою оболонкою та неметалевою складовою.

За характером розміщення наповнювача у виливку литі системи з неметалевими компонентами можна поділити на чотири основні групи:

1. Дисперсно-наповнені виливки, у яких частинки неметалевого матеріалу рівномірно або відносно рівномірно розподілені в об'ємі металевої матриці. До цієї групи належать класичні металоматричні композити, властивості яких визначаються складом матриці, природою армувальних частинок, їх кількістю, розміром, змочуванням і рівномірністю розподілу.

2. Локально зміцнені виливки, у яких неметалевий компонент зосереджений у робочій, поверхневій або найбільш навантаженій зоні виробу. Такий підхід застосовують тоді, коли необхідно підвищити зносостійкість,

жаростійкість або інші спеціальні властивості лише в окремій частині виливка без зміни властивостей усього його об'єму.

3. Виливки зі вставками або преформами, у яких попередньо виготовлений неметалевий, металевий або комбінований елемент розміщується у формі перед заливанням. Після контакту з розплавом така вставка може частково просочуватися металом, утворювати механічний зв'язок або вступати у фізико-хімічну взаємодію з металевою складовою.

4. Бінарні виливки типу «металева оболонка — неметалевий наповнювач», у яких неметалевий матеріал займає внутрішній об'єм виробу, а залізовуглецевий сплав формує зовнішню оболонку або силовий каркас. У таких системах наповнювач не вводиться в розплав у вигляді окремих частинок, а попередньо розміщується у заданому об'ємі майбутнього виливка.

Саме четверта група становить предмет дисертаційного дослідження. Її принципова відмінність від дисперсно-армованих композитів полягає в тому, що неметалевий наповнювач не розподілений у металевій матриці, а просторово відокремлений і виконує самостійну конструктивну функцію, заміщуючи частину металу. У такій системі металева оболонка сприймає розтягувальні, згинальні та ударні навантаження, забезпечує геометричну цілісність виробу і захищає наповнювач від зовнішнього середовища. Наповнювач, у свою чергу, працює переважно на стиск, зменшує масу виробу, може поглинати енергію локального впливу або виконувати функцію теплоізоляційного бар'єра.

Важливою умовою працездатності бінарного виливка є формування контактної або перехідної зони між металевою оболонкою та неметалевим наповнювачем. Саме ця зона визначає характер зв'язку між складовими, можливість передачі навантаження, стійкість наповнювача до викришування та здатність виливка працювати як єдина конструктивна система. Якщо контакт між металом і наповнювачем є недостатнім, неметалева складова може залишатися лише вільно розміщеним внутрішнім заповнювачем. У разі

формування перехідного шару вона інтегрується у виливок і бере участь у його роботі разом із металевою оболонкою [16, 17].

Отже, виливки із залізовуглецевих сплавів з інтегрованими неметалевими наповнювачами можна розглядати як окремий напрям литих композиційних матеріалів, у якому основне значення має не дисперсне зміцнення металевої матриці, а поєднання металевої оболонки, внутрішнього наповнювача та перехідної зони між ними. Подальший огляд літератури зосереджено на дослідженнях, пов'язаних із формуванням таких бінарних систем, властивостями рідкоскляних сумішей як інтегрованих наповнювачів та умовами одержання виливків за ЛГМ-процесом.

## **1.2 Ливарні методи одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з неметалевими наповнювачами**

Метод одержання литого композиційного виробу визначає не лише властивості матеріалу, а й саму можливість реалізувати задану конструктивну схему. Для системи «залізовуглецевий сплав - неметалевий наповнювач» принципове значення мають спосіб уведення наповнювача, характер його просторового розташування у виливку, стійкість під час заливання та умови формування контакту з металевою складовою. Якщо для традиційних дисперсно-армованих композитів основним завданням є рівномірний розподіл частинок у розплаві або в металевій матриці після твердіння, то для бінарного виливка типу «металева оболонка - неметалевий наповнювач» необхідно заздалегідь зафіксувати наповнювач у заданій зоні та сформувати навколо нього суцільну металеву оболонку в одному технологічному циклі.

У таких виливках наповнювач не повинен повністю перемішуватися з розплавом або втрачати власну просторову конфігурацію. Навпаки, він має зберегти положення, задане конструкцією моделі або форми, витримати тепловий і гідродинамічний вплив рідкого металу, а після охолодження залишитися інтегрованим у внутрішній об'єм виробу. Тому придатність

кожного ливарного методу до одержання таких систем доцільно оцінювати не лише за можливістю введення неметалевої фази, а й за здатністю забезпечити формування системи «оболонка — наповнювач — перехідна зона». Нижче розглянуто основні ливарні методи з огляду на їх придатність для вирішення цієї задачі.

### **Механічне перемішування розплаву з неметалевими частинками**

Механічне перемішування розплаву з неметалевими частинками, або stir casting, є одним із найпоширеніших рідкофазних способів одержання металоматричних композитів, армованих дисперсними частинками [18, 19–21]. Сутність методу полягає у введенні неметалевих частинок у рідкий або напіврідкий метал із подальшим перемішуванням для їх розподілу в об'ємі матриці. Перевагою такого підходу є відносна простота обладнання, можливість одержання виливків традиційними ливарними способами після перемішування розплаву та перспективність для серійного виробництва дисперсно-армованих матеріалів.

Разом з тим більшість відпрацьованих режимів stir casting стосується переважно алюмінієвих та інших легкоплавких матриць. Перенесення цього досвіду на залізовуглецеві сплави ускладнюється значно вищою температурою розплаву, інтенсивнішою взаємодією металу з неметалевими частинками, різницею густини між фазами та проблемами змочування. У таких умовах можливі нерівномірний розподіл частинок, хімічна неоднорідність, агломерація, осідання або спливання неметалевої фази, а також утворення пористості [6, 7]. Для часткового усунення цих недоліків застосовують попереднє підігрівання частинок, нанесення покриттів, легування матриці або спеціальні режими перемішування, однак це ускладнює технологію і не змінює її принципової спрямованості.

Головне обмеження цього методу для теми даної роботи полягає в тому, що механічне перемішування формує дисперсно-армовану металеву матрицю, а не окремий внутрішній неметалевий об'єм. Наповнювач у такій схемі

втрачає власну геометрію і не може виконувати роль самостійної конструктивної зони. Тому, незважаючи на значну поширеність stir casting для металоматричних композитів, цей метод не є придатним для одержання бінарних виливків типу «металева оболонка — неметалевий наповнювач».

### **Просочення пористих преформ і каркасів**

Метод просочення передбачає попереднє виготовлення пористої преформи або каркаса з неметалевого матеріалу з подальшим заповненням його порового простору рідким металом. Просочення може відбуватися під дією зовнішнього тиску, вакууму, капілярних сил або їх поєднання. Такий підхід дає змогу отримувати матеріали з високою об'ємною часткою армувальної фази, а також формувати зносостійкі або жаростійкі композиційні шари на чавунній чи сталевій основі [4, 8, 22, 23].

Для виливків із неметалевими наповнювачами метод просочення є важливим з погляду розуміння контактних процесів між рідким металом і пористим неметалевим середовищем. Зокрема, обмежене проникнення металу в приповерхневу зону рідкоскляного наповнювача може бути корисним для формування перехідного шару. На можливість такого явища вказують дані щодо проникнення чавуну в піщану форму [17]. У цьому випадку метал частково входить у поровий простір зернистого матеріалу, створюючи механічний або фізико-хімічний зв'язок на межі поділу.

Однак для бінарних виливків повне просочення всього об'єму наповнювача є небажаним. Якщо поровий простір буде повністю заповнений металом, зникне конструкційна відмінність між металевою оболонкою та неметалевим наповнювачем, а система фактично перетвориться на інший тип композиційного матеріалу. Крім того, виготовлення преформи, яка одночасно має бути достатньо міцною, проникною, терmostійкою та здатною зберігати задану геометрію під час заливання, залишається складною технологічною задачею. Тому метод просочення доцільно розглядати як аналог для пояснення контактних явищ і формування перехідного шару, але не як повноцінну

самостійну схему одержання бінарних виливків із внутрішнім неметалевим наповнювачем.

### **Відцентрове лиття**

Відцентрове лиття застосовують для одержання виробів, у яких розплав розподіляється у формі під дією відцентрових сил. У галузі композиційного лиття цей метод використовують для формування функціонально-градієнтних матеріалів, де армувальні частинки перерозподіляються за перерізом виливка залежно від густини фаз, швидкості обертання та умов твердіння [24–27]. У результаті може утворюватися збагачений частинками поверхневий або внутрішній шар, що корисно для підвищення зносостійкості або інших спеціальних властивостей.

Перевагою відцентрового лиття є можливість формування щільних осесиметричних виробів, зокрема втулок, кілець і труб. Однак розташування неметалевої фази у цьому випадку визначається не заданою геометрією внутрішнього об'єму, а співвідношенням густини металу і частинок, параметрами обертання та гідродинамікою розплаву. Тобто метод дає змогу керувати переважно радіальним перерозподілом частинок, але не забезпечує фіксації об'ємного наповнювача у наперед визначеній зоні складної форми.

Для бінарного виливка типу «металева оболонка — неметалевий наповнювач» це є принциповим обмеженням. У разі використання зволоженого або пластичного рідкоскляного наповнювача його положення в центральній зоні виливка буде нестабільним, а дія відцентрових сил може спричинити зсув, ущільнення або руйнування наповнювача. Крім того, цей метод обмежений переважно осесиметричними виробами. Тому відцентрове лиття може бути ефективним для градієнтних композиційних заготовок, але не забезпечує формування бінарної конструкції з фіксованим внутрішнім неметалевим наповнювачем.

### **Лиття з локальними вставками та преформами**

Попереднє розміщення у формі неметалевих вставок, каркасів, преформ або композиційних шарів є найбільш близьким до ідеї бінарних виливків серед традиційних ливарних підходів. У цьому випадку неметалевий або комбінований елемент установлюють у форму до заливання, після чого рідкий метал оточує його, частково просочує або формує з ним механічний чи реакційний зв'язок. Відомі приклади армування чавуну композиційними вставками [28], використання керамічних брусків у сталевих виливках [29], а також одержання макрогетерогенних композитів із локально розміщеними армувальними елементами [30, 31–34]. Патентні рішення [35–38] також підтверджують практичний інтерес до такого підходу.

Перевагою цього методу є можливість локального розміщення функціонального елемента саме в тій зоні вилівка, де необхідно змінити властивості матеріалу або конструкції. Вставки можуть виконувати зносостійку, жаростійку, теплоізоляційну або армувальну функцію. Водночас основними проблемами залишаються надійна фіксація вставки у формі, запобігання її зміщенню або виштовхуванню розплавом, компенсація різниці теплового розширення між вставкою і металом, а також формування якісного контакту між складовими.

Для рідкоскляного наповнювача ці питання мають додаткову специфіку. На відміну від суцільної керамічної вставки, рідкоскляний наповнювач є зернистою системою, міцність якої формується поступово: спочатку за рахунок підсушування або пров'ялювання, а потім — під дією тепла рідкого металу. Такий наповнювач повинен витримати заповнення форми розплавом, не бути зруйнованим або винесеним потоком металу, зберегти задане положення та забезпечити умови для формування перехідного шару на межі з металевією оболонкою.

У традиційному литті стрижні з рідкоскляних сумішей після заливання, як правило, видаляють із виливка. У бінарних виливках із неметалевим наповнювачем ситуація принципово інша: рідкоскляна суміш повинна

залишитися у внутрішньому об'ємі виробу як функціональний елемент. Тому метод вставок і преформ створює загальну технологічну основу для розміщення неметалевої складової у формі, але потребує адаптації до матеріалу наповнювача, умов його закріплення та способу формування металевої оболонки.

### **Лиття за моделями, що газифікуються**

Лиття за моделями, що газифікуються, суттєво відрізняється від розглянутих вище методів тим, що геометрію майбутнього виливка задає пінополістиролова модель, яка під час заливання заміщується розплавом. Для одержання бінарних виливків ця особливість є принципово важливою, оскільки модель може мати внутрішню порожнину, у яку попередньо вводять і ущільнюють неметалевий наповнювач. Після газифікації пінополістиролу метал формує оболонку навколо наповнювача, а неметалевий матеріал залишається у внутрішньому об'ємі виробу.

Такий підхід дозволяє заздалегідь задати геометрію наповнювача, його положення у виливку та товщину майбутньої металевої оболонки. Саме це відрізняє ЛГМ від способів, у яких неметалева фаза вводиться безпосередньо в розплав або переміщується під дією зовнішніх сил. Схожі технологічні підходи реалізовано в роботах О. Й. Шинського та співавторів для порожнистих сталевих конструкцій з композитним наповнювачем [9, 10], а також у дослідженнях армованих виливків, одержаних за ЛГМ-процесом [39].

Перевагою ЛГМ для системи «металева оболонка - неметалевий наповнювач» є те, що наповнювач фіксується в моделі ще до заливання. Це зменшує ризики, характерні для дисперсного введення неметалевих частинок у розплав: агломерацію, осідання, спливання, нерівномірний розподіл і втрату заданої конфігурації неметалевої фази. Крім того, відсутність традиційних стрижневих ящиків і можливість формування внутрішнього об'єму без складних стрижневих систем роблять ЛГМ технологічно зручним для одержання виливків із попередньо розміщеним наповнювачем.

Разом з тим реалізація такої схеми супроводжується низкою технологічних питань, які визначають працездатність бінарного виливка.

Газовий режим. Під час заливання пінополістиролова модель термічно деструктує з утворенням газоподібних і рідких продуктів. Ці продукти повинні своєчасно відводитися через формувальний пісок, шар протипригарного покриття та поровий простір наповнювача. Оскільки внутрішня поверхня моделі в зоні контакту з наповнювачем не ізолюється протипригарним покриттям, газовідведення та проникність наповнювача мають важливе значення для стабільного заповнення форми. У разі утрудненого відведення газів можливі порушення контакту на межі «метал - наповнювач», утворення газових дефектів або локальне послаблення перехідної зони.

Термічний вплив на наповнювач. Під час заливання рідкий метал передає наповнювачу значну кількість теплоти. У рідкоскляній суміші при цьому відбуваються видалення вологи та зв'язаної води, зміни стану силікатного зв'язувального, ущільнення контактів між зернами кварцового піску та формування більш міцної структури після охолодження. Відомо, що рідкоскляні суміші після нагрівання можуть набувати значної залишкової міцності [13–15]. Для бінарних виливків це важливо, оскільки така зміна стану наповнювача сприяє збереженню його цілісності та підвищенню опору механічному руйнуванню. Водночас для конкретної системи необхідно встановити температурно-часові умови прогрівання, за яких наповнювач не руйнується, а набуває достатньої міцності.

Формування перехідної зони. Наявність металевої оболонки і наповнювача ще не гарантує їх сумісної роботи як єдиної конструкції. Для цього на межі контакту має сформуватися перехідна зона, здатна забезпечити зв'язок між складовими. Експериментально показано, що на межі «сірий чавун - інтегрований неметалевий наповнювач» утворюється перехідний шар, пов'язаний із капілярним проникненням розплаву та фізико-хімічною взаємодією [16]. Проте товщина, суцільність і властивості такого шару

залежать від температури заливання, складу наповнювача, ступеня його ущільнення, проникності та умов охолодження. Тому ці параметри потребують окремого дослідження для прогнозованого керування якістю контакту між металом і наповнювачем.

Отже, лиття за моделями, що газифікуються, створює необхідні технологічні передумови для одержання бінарних виливків із попередньо розміщеним неметалевим наповнювачем. Саме цей метод дає змогу поєднати фіксацію наповнювача в заданому об'ємі, формування навколо нього металевої оболонки та утворення перехідної зони в одному технологічному циклі. Водночас реалізація такого підходу потребує обґрунтування складу наповнювача, параметрів заливання, умов газовідведення, термічного зміцнення наповнювача та формування контакту з металевою оболонкою.

Загальну характеристику розглянутих методів щодо придатності для формування виливків типу «металева оболонка - неметалевий наповнювач» наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 Порівняння ливарних методів одержання виливків із неметалевими наповнювачами.

| Метод                   | Характер інтеграції наповнювача | Основні переваги                                           | Обмеження щодо бінарної системи                                                                        |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Механічне перемішування | Дисперсний розподіл у матриці   | Простота реалізації, відомі схеми для Al-сплавів           | Ліквация, агломерація, погане змочування в Fe–C розплавах; не формує окремого внутрішнього наповнювача |
| Просочення преформ      | Металонасичений пористий каркас | Висока об'ємна частка армувальної фази, локальне зміцнення | Потребує міцної та проникної преформи; повне просочення нівелює різницю між оболонкою та наповнювачем  |

|                                     |                                                                |                                                                                                                                               |                                                                                                                                   |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Відцентрове лиття                   | Градiєнтний розподіл за радіусом                               | Щільні осесиметричні заготовки, ефективне для тіл обертання                                                                                   | Фіксація наповнювача в довільній порожнині неможлива; розподіл залежить від густини фаз                                           |
| Локальні вставки / преформи         | Локальний об'єм або шар                                        | Попереднє розміщення функціонального елемента                                                                                                 | Складність розміщення, ризик руйнування, невизначеність щодо контактної зони поєднання компонентів                                |
| Лиття за моделями, що газифікуються | Металева оболонка навколо попередньо встановленого наповнювача | Порожнина задається моделлю; наповнювач розміщується в моделі до заливання і не переміщується з розплавом; оболонка формується в одному циклі | Необхідність забезпечення газовідведення; ризик пошкодження наповнювача; недослідженість умов формування надійної перехідної зони |

Порівняння ливарних методів одержання виливків із неметалевими наповнювачами, показує, що ЛГМ є методом, який дозволяє реалізувати технологічне рішення «оболонка–наповнювач».

### **1.3 Визначення невирішених питань та обґрунтування напрямку дослідження**

Проведений у підрозділах 1.1 та 1.2 аналіз дозволяє окреслити сучасний стан проблеми та визначити коло питань, що потребують першочергового вирішення. Узагальнення літературних даних показує, що литі композиційні матеріали із залізовуглецевою металевою основою та неметалевими компонентами розвиваються у кількох напрямках: дисперсне армування металевої матриці, локальне зміцнення робочих поверхонь, використання вставок і преформ, формування макрогетерогенних литих систем та

одержання виливків типу «металева оболонка — неметалевий наповнювач». Проте більшість відомих досліджень зосереджена переважно на підвищенні властивостей металевої матриці або окремих зон виливка, тоді як питання формування цілісної бінарної системи з інтегрованим внутрішнім неметалевим наповнювачем досліджені недостатньо.

У підрозділі 1.1 показано, що виливки із залізовуглецевих сплавів з неметалевими наповнювачами доцільно розглядати як окремий напрям литих композиційних матеріалів, який не зводиться до традиційного дисперсного армування [1–3, 6, 18, 40, 41]. У бінарних системах типу «металева оболонка — неметалевий наповнювач» наповнювач не диспергований у матриці, а займає окрему конструктивну зону і виконує самостійні функції: сприйняття стискальних навантажень, зменшення металоємності, енергопоглинання та підвищення захисних властивостей конструкції [9, 10, 42–45]. У такій системі металева оболонка формує зовнішній силовий каркас, забезпечує геометричну цілісність виробу та сприйняття зовнішніх навантажень, тоді як неметалевий наповнювач частково заміщує металевий об'єм і бере участь у роботі виробу переважно за умов стиску, локального механічного впливу або теплового навантаження.

Для таких систем принциповим є формування перехідної зони між оболонкою та наповнювачем, яка визначає сумісну роботу всієї конструкції [6, 7, 16, 17, 46–48]. Якщо контакт між металом і наповнювачем є недостатнім, неметалевий компонент може залишатися лише внутрішнім заповнювачем, що не бере повноцінної участі у роботі виливка. Натомість формування перехідного шару створює передумови для механічного, капілярного або фізико-хімічного зв'язку між складовими, що важливо для збереження цілісності бінарної системи після заливання, охолодження та подальшого навантаження.

Як перспективний матеріал наповнювача виділено рідкоскляну суміш на основі кварцового піску, властивості якої — доступність, вогнетривкість,

здатність до ущільнення та термічного зміцнення — створюють передумови для її використання як інтегрованого функціонального елемента [11, 12, 13–15, 49–54]. У традиційному ливарному виробництві такі суміші використовують переважно як формувальні або стрижневі матеріали, які після заливання підлягають видаленню з виливка. У межах цієї роботи рідкоскляна суміш розглядається інакше: не як тимчасовий технологічний елемент форми, а як наповнювач, що залишається у внутрішньому об'ємі виливка та після теплового впливу розплаву повинен зберігати цілісність, набувати достатньої міцності й утворювати контакт із металевою оболонкою.

У підрозділі 1.2 проаналізовано ливарні методи одержання виливків із неметалевими наповнювачами. Встановлено, що механічне перемішування розплаву з неметалевими частинками супроводжується труднощами забезпечення рівномірного розподілу, запобігання агломерації, осіданню або спливанню наповнювача [18, 19–21, 55]. Крім того, такий підхід не забезпечує формування окремого внутрішнього неметалевого об'єму, оскільки наповнювач втрачає власну просторову конфігурацію і розподіляється у металевій матриці.

Методи просочення преформ потребують контрольованої пористості каркаса, достатнього змочування та проникнення розплаву в поровий простір [22–23, 38, 56–58]. Вони є важливими для розуміння механізмів взаємодії металу з пористим неметалевим середовищем, однак у разі повного просочення преформи металом зникає конструктивна відмінність між оболонкою та наповнювачем. Відцентрове лиття орієнтоване переважно на формування шаруватих або градієнтних виливків за рахунок перерозподілу частинок під дією відцентрових сил [24–27], тому воно не забезпечує стабільної фіксації наповнювача в заздалегідь визначеному внутрішньому об'ємі.

Лиття з локальними вставками та преформами дає можливість зміцнювати окремі ділянки виливків, однак не завжди забезпечує формування

бінарної конструкції з внутрішнім неметалевим об'ємом в одному технологічному циклі [28, 30–34, 39, 59]. Основними обмеженнями залишаються фіксація вставки у формі, запобігання її зміщенню під дією потоку металу, різниця теплофізичних властивостей металу і неметалевого матеріалу, а також забезпечення надійного контакту між ними. Для зернистого рідкоскляного наповнювача ці питання є ще складнішими, оскільки його міцність формується поступово і залежить від складу суміші, ступеня ущільнення та теплового впливу розплаву.

Лиття за моделями, що газифікуються, створює найбільш сприятливі технологічні передумови для попереднього розміщення неметалевого наповнювача у заданій зоні моделі та формування навколо нього металеві оболонки [9, 10, 39, 60]. Перевага ЛГМ-процесу полягає в тому, що геометрія майбутнього виливка і положення наповнювача задаються ще на стадії виготовлення пінополістиролової моделі. Це дозволяє уникнути перемішування наповнювача з розплавом, забезпечити його фіксоване положення і сформувати систему «металева оболонка — неметалевий наповнювач» без додаткових операцій складання після лиття. Разом із тим реалізація цього підходу в ЛГМ-процесі пов'язана з низкою невирішених технологічних питань, які стосуються обґрунтування вибору наповнювача, механізму формування бінарної системи, теплового моделювання, газового режиму та закономірностей утворення перехідного шару.

Аналіз результатів попередніх досліджень показує, що у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України закладено основи моделювання теплових процесів у литих композиційних матеріалах [61–63]. Зокрема, розроблено підходи до оцінювання теплового стану гетерогенних виливків з урахуванням фазових перетворень та неідеального теплового контакту на межі компонентів [61–62]. Показано, що масове співвідношення матричного сплаву та наповнювача є визначальним фактором якості зчеплення фаз [64], а для кожного діаметра армувального елемента існує

гранична об'ємна частка, перевищення якої призводить до формування стійкої твердої кірки та погіршення з'єднання [65].

Разом із тим зазначені моделі та підходи розроблено переважно для систем із металевими або щільними армувальними елементами. Неметалеві рідкоскляні наповнювачі мають інший характер поведінки під час заливання: нижчу теплопровідність, пористу зернисту будову, наявність силікатного зв'язувального та здатність до структурних змін під час нагрівання. У процесі контакту з розплавом у такому наповнювачі відбуваються видалення вологи та зв'язаної води, зміна стану рідкого скла, ущільнення контактів між зернами кварцового піску та формування зміцненої силікатної складової. Тому існуючі підходи потребують адаптації до умов формування виливків із рідкоскляним неметалевим наповнювачем.

Найближчими до теми даної роботи є дослідження, у яких розглянуто локальне введення функціональних елементів у виливок та технологічні можливості ЛГМ-процесу для одержання порожнистих литих конструкцій. Зокрема, у роботі [28] показано можливість армування чавуну композиційною вставкою, що підтверджує доцільність локального введення додаткової фази у виливок, яка залишається в заданій зоні, а не поширюється на всю матрицю. Окремо слід відзначити роботу [66], у якій розглянуто ливарну технологію одержання порожнистого литого захисного модуля за моделями, що газифікуються. Такі роботи підтверджують перспективність підходів, пов'язаних із локальним формуванням функціональних зон у виливку та використанням ЛГМ-процесу для одержання складнопрофільних оболонкових конструкцій.

Водночас у зазначених дослідженнях не розкрито закономірності формування системи «чавун — рідкоскляний наповнювач» в умовах ЛГМ-процесу. Недостатньо досліджено вплив складу наповнювача, ступеня його ущільнення, температури заливання, теплового режиму та контактної взаємодії на формування перехідної зони і збереження цілісності наповнювача

після заливання. Не встановлено також, за яких умов рідкоскляна суміш може не видалятися після лиття, а залишатися в об'ємі виливка як інтегрований функціональний елемент, здатний працювати разом із металевою оболонкою.

Незважаючи на наявні результати, аналіз сучасного стану досліджень дозволяє визначити низку питань, які потребують подальшого вирішення для обґрунтування технології одержання виливків із залізовуглецевих сплавів з неметалевими наповнювачами за моделями, що газифікуються:

1. Потребує обґрунтування вибір рідкоскляної суміші як інтегрованого внутрішнього наповнювача з визначенням її раціонального складу, технологічних властивостей, теплофізичних характеристик і здатності зберігати цілісність під час теплового удару від розплаву.
2. Залишається недостатньо з'ясованим механізм формування бінарної системи «металева оболонка — неметалевий наповнювач» в умовах ЛГМ-процесу, коли наповнювач займає окремий конструктивний об'єм і оточується металом в одному технологічному циклі.
3. Існуючі математичні моделі тверднення та охолодження виливків потребують адаптації до умов наявності неметалевого наповнювача з низькою теплопровідністю, пористістю та структурними змінами під час нагрівання, що необхідно для прогнозування температурних полів і теплового стану системи «метал — наповнювач — форма».
4. Не встановлено кількісних зв'язків між технологічними параметрами — температурою заливання, складом наповнювача, ступенем ущільнення, умовами прогрівання — та характеристиками перехідної зони, зокрема її товщиною, суцільністю, мікроструктурою і локальними властивостями металевої оболонки поблизу межі з наповнювачем.
5. Недостатньо досліджено здатність рідкоскляного наповнювача після теплового впливу розплаву чинити опір механічному руйнуванню, що важливо для оцінювання його функціональної ролі у внутрішньому об'ємі бінарного виливка.

Виходячи з викладеного, метою дисертаційної роботи є розроблення технологічних основ одержання бінарних виливків типу «металева оболонка — неметалевий наповнювач» на основі сірого чавуну та рідкоскляної суміші методом лиття за моделями, що газифікуються, на базі дослідження тепломасообмінних процесів, формування перехідної зони та поведінки рідкоскляного наповнювача після теплового впливу розплаву. Обґрунтування такого напрямку спирається на результати попередніх досліджень литих композиційних матеріалів, ЛГМ-процесу, рідкоскляних сумішей і контактної взаємодії металу з неметалевими наповнювачами [9, 13–16, 48–54, 60–63].

### **Висновки до розділу 1**

1. Виливки із залізовуглецевих сплавів з неметалевими наповнювачами становлять окремий напрям литих композиційних матеріалів, у якому властивості виробу визначаються не лише металевою оболонкою, а й характером розміщення, станом і призначенням наповнювача в системі «оболонка — наповнювач — перехідна зона».

2. Показано, що рідкоскляні суміші на основі кварцового піску є перспективними для використання як інтегровані неметалеві наповнювачі завдяки доступності, вогнетривкості, здатності до ущільнення в порожнині моделі та можливості термічного зміцнення після контакту з розплавом. На відміну від традиційного використання таких сумішей як стрижневих матеріалів, у бінарному виливку вони мають залишатися у виробі як функціональний внутрішній елемент.

3. Огляд ливарних методів показав, що механічне перемішування, просочення преформ, відцентрове лиття та використання локальних вставок мають суттєві обмеження для одержання бінарних виливків із внутрішнім неметалевим об'ємом. Найбільш придатним для реалізації схеми «оболонка — наповнювач» є лиття за моделями, що газифікуються, яке дозволяє попередньо

розмістити наповнювач у моделі та сформувати металеву оболонку в одному технологічному циклі.

4. Попереднє розміщення наповнювача саме по собі не гарантує якості виливка. Під час заливання на нього діють потік розплаву, газів термодеструкції полістиролу, тепловий удар та усадкові напруження, тому критичними залишаються збереження цілісності наповнювача та формування надійної перехідної зони.

5. Аналіз попередніх досліджень литих композиційних матеріалів показав, що наявні підходи до моделювання теплових процесів і формування контакту між компонентами потребують адаптації для систем із рідкоскляним неметалевим наповнювачем. Це зумовлено його пористою зернистою будовою, нижчою теплопровідністю, наявністю силікатного зв'язувального та структурними змінами під час нагрівання.

6. Аналіз літературних даних свідчить, що недостатньо вивченими є закономірності формування виливків із рідкоскляним наповнювачем, попередньо розміщеним у пінополістироловій моделі. Зокрема, потребують уточнення вплив складу наповнювача на його стійкість після теплової дії, умови утворення перехідної зони та зв'язок між її структурою і здатністю системи чинити опір руйнуванню.

7. Обґрунтовано напрям подальших досліджень, який полягає в розробленні технологічних підходів до одержання бінарних виливків з інтегрованим неметалевим наповнювачем за ЛГМ-процесом на основі теоретичного аналізу теплових і фізико-хімічних процесів у системі «метал — наповнювач».

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ

### 2.1 Вибір матеріалів та їх характеристики

Одержання виливків із неметалевими наповнювачами за моделями, що газифікуються, передбачає сумісне формування металевої оболонки, внутрішньої неметалевої фази та перехідного шару між ними. Виходячи із цього, вибір матеріалів визначався здатністю забезпечити спільну роботу складових системи «металева оболонка - неметалевий наповнювач» під час заливання, тверднення та подальшої роботи в умовах механічних і динамічних навантажень.

До матеріалу наповнювача висуваються такі вимоги: низька густина, здатність зберігати форму при контакті з розплавом, хімічна сумісність із матрицею або здатність до керованої взаємодії, достатня міцність, технологічність, сумісність із ЛГМ-процесом та економічна доцільність.

Для аналізу впливу теплофізичних властивостей наповнювача було обрано два матеріали, що відрізняються за природою та структурою: рідкоскляну суміш (РСС) та керамзит.

**Рідкоскляна суміш** на основі кварцового піску та натрієвого рідкого скла була обрана як основний неметалевий наповнювач завдяки поєднанню вогнетривкості, технологічної доступності та здатності до зміцнення після дії високої температури розплаву.

Вибір рідкоскляної суміші обумовлений такими підставами: 1) наявність кремнеземної складової кварцового піску та силікатної фази рідкого скла створює передумови для фізико-хімічної взаємодії на межі контакту з металевою оболонкою і можливого утворення силікатних сполук; 2) пориста будова ущільненої суміші забезпечує умови для локального проникнення розплаву в приповерхневу ділянку наповнювача, що сприяє механічному зчепленню металу з неметалевою фазою; 3) відносно висока теплоакумульовальна здатність рідкоскляної суміші впливає на тепловий стан

контактної зони та може сприяти формуванню більш вираженого перехідного шару з наповнювачем.

Крім того, під час нагрівання рідкоскляної суміші відбувається видалення вологи, перебудова силікатної зв'язки та зміна міцності зв'язувальних містків між зернами кварцового піску, а кількість і модуль рідкого скла істотно впливають на залишкову міцність формувальних сумішей після нагрівання, особливо у високотемпературному інтервалі [13, 49].

До складу РСС входили:

Кварцовий пісок використовували як мінеральну основу неметалевого наповнювача [67]. У роботі застосовували доступний дрібний річковий кварцовий пісок.

Гранулометричний склад (рис. 2.1) визначено просіюванням наважки 100 г через стандартний набір сит. Основна частка припадає на дрібні фракції, що сприяло щільному заповненню внутрішнього об'єму: залишок на ситі 0,2 мм - 33,9 %, на ситі 0,315 мм - 21,8 %, на ситі 0,4 мм - 13,4 %. Вміст пилоподібної фракції розміром менше 0,16 мм становив 6,0 %.

Зв'язувальним компонентом було натрієве рідке скло з силікатним модулем 2,9 [68]. Для встановлення впливу кількості зв'язувального на властивості наповнювача вміст рідкого скла варіювали в діапазоні 4–16 г на 100 г кварцового піску.

Теплофізичні властивості РСС:

Густина суміші (до спікання):  $\sim 2700 \text{ кг/м}^3$ .

Теплопровідність ( $\lambda$ ):  $2,58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Теплоємність (с): діапазон 1170–2008 Дж/(кг·К) (змінюється з температурою).

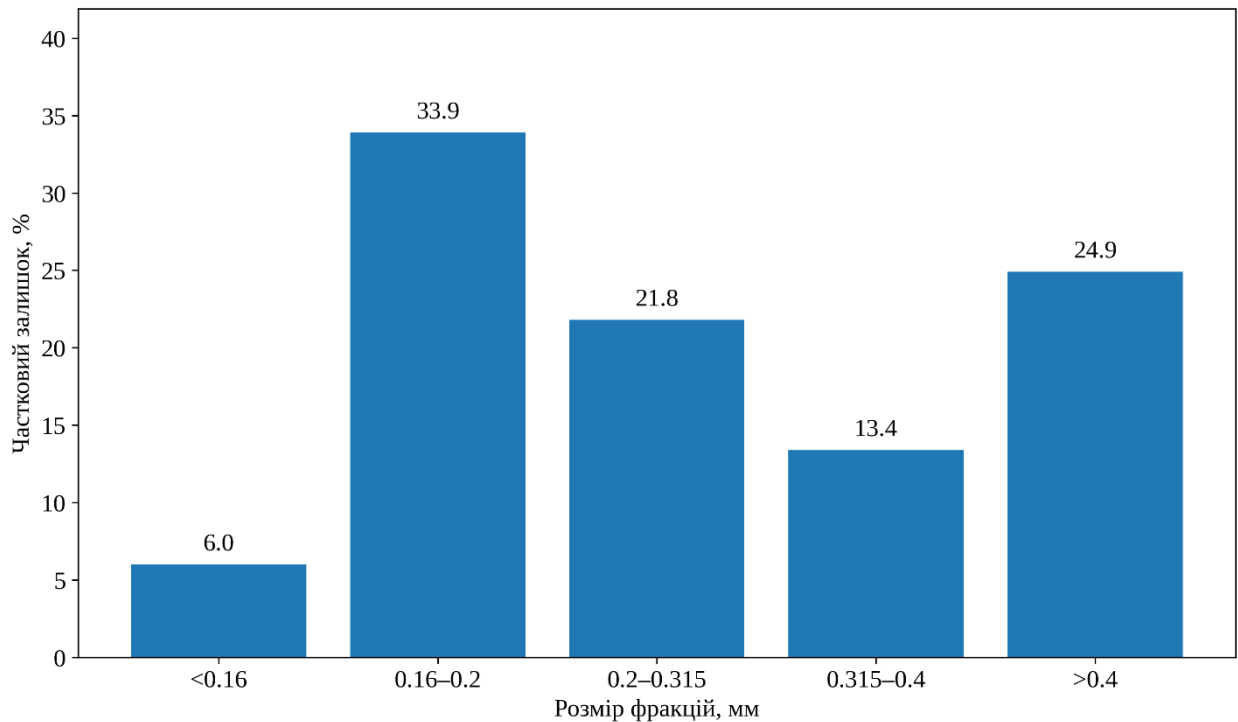


Рисунок 2.1 Гістограма гранулометричного складу кварцового піску: розподіл часткового залишку (%) за розміром фракцій (мм).

Як порівняльний матеріал для наповнювача було обрано керамзит за такими критеріями: 1) низькою насипною густиною, що забезпечує максимальне зниження маси виливка; 2) низькою теплопровідністю, яка уповільнює тепловідведення і може зменшувати ризик відбілу чавуну в тонких стінках; 3) порівняно низькою хімічною активністю до залізовуглецевих розплавів.

Механічні випробування зразків із цим наповнювачем не проводилися, він використовувався для моделювання теплових процесів та виготовлення дослідного сегмента модуля, для оцінювання впливу низької густини та теплоізолювальних властивостей наповнювача на теплові умови формування виливка.

Склад та властивості керамзиту:

Тип: керамзитовий гравій фракції 5–10 мм.

Марка за густиною: М600 (насипна густина 600–670 кг/м<sup>3</sup>).

Теплофізичні властивості:  $\lambda = 0,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $c = 840\text{--}920 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

**Полістирол.** Для виготовлення пінополістиролових моделей застосовували полістирол марки D833В. Процес виготовлення включав попереднє підспінювання гранул для досягнення потрібної насипної густини з подальшим формуванням моделі автоклавним способом. Використання пінополістиролової моделі забезпечувало можливість попереднього розміщення неметалевого наповнювача у внутрішньому об'ємі моделі та подальшого формування виливка за технологією ЛГМ [69].

**Матричний сплав.** Для експериментальної перевірки технології отримання біметалевих виливків методом ЛГМ як основний матеріал металевої оболонки обрано сірий чавун марки СЧ200 за ДСТУ 8833:2019 [70].

Хімічний склад СЧ200: С 3,2-3,4 %; Si 1,8-2,2 %; Mn 0,5-0,8 % і теплофізичні властивості:  $T_{\text{лікв}} = 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{сол}} = 1175 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , теплопровідність  $\lambda = 55,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , густина  $\rho = 7200 \text{ кг/м}^3$ .

Сірий чавун марки СЧ200 обрано для відпрацювання технологічних режимів через низьку вартість, високу рідкоплинність, малу усадку та добру змочуваність оксидних поверхонь. Основний обсяг експериментальних досліджень виконано для чавуну СЧ200.

Для порівняльної оцінки можливості застосування запропонованої технологічної схеми також розглядали сталь 35Л [71,72], що дає можливість оцінити вплив вищої температури заливання та іншого хімічного складу металевої оболонки на умови формування виливка.

Розроблена технологія може бути використана для виготовлення захисних модулів, а також для створення інших литих бінарних конструкцій, де внутрішній об'єм виливка заповнюється функціональним наповнювачем.

З огляду на те, що неметалевий наповнювач після спікання працює на стиск і не дає усадки, система «СЧ200–наповнювач» є цілком придатною для металомістких виливків, навантажених переважно вздовж осі, наприклад, станин верстатів. У таких конструкціях основне навантаження є стискальним,

і сірий чавун разом з ущільненим наповнювачем здатен його сприймати без утворення пустот чи деформацій. Це дає змогу частково замінити метал у внутрішньому об'ємі, знижуючи металоємність і вартість виробу без втрати його функціональності.

Для захисних елементів, що сприймають динамічні навантаження, для серійного виробництва рекомендовано заміну сірого чавуну на високоміцний чавун марки ВЧ 350-22 [73], який має ударну в'язкість, близьку до сталі, що суттєво підвищує захисні властивості металевої оболонки. Технологія виготовлення виливків із неметалевим наповнювачем при цьому не змінюється, оскільки основні теплофізичні та ливарні характеристики високоміцного чавуну залишаються близькими до параметрів СЧ200, а відпрацьовані на модельному сплаві режими можуть бути адаптовані з мінімальними коригуваннями.

## **2.2 Методика виготовлення дослідних зразків із рідкоскляним наповнювачем**

Для експериментальних досліджень за технологією лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), виготовляли дослідні чавунні та сталеві зразки трубчастого типу з внутрішньою порожниною, внутрішню порожнину яких заповнювали рідкоскляною сумішшю.

Рідкоскляну суміш для наповнення отримували змішуванням дрібного річкового кварцового піску та натрієвого рідкого скла з силікатним модулем 2,9, яке використовували як зв'язувальний компонент.

Пінополістиролові модельні заготовки виготовляли автоклавним способом із використанням спеціальної прес-форми. У процесі автоклавного формування гранули пінополістиролу спікалися між собою, утворюючи цілісну циліндричну заготовку із центральною порожниною. Після вилучення з прес-форми заготовку розрізали струною на окремі пінополістиролові моделі висотою 50 мм. Після різання контролювали рівність торцевих поверхонь,

відповідність висоти моделей, зовнішнього діаметра та діаметра внутрішньої порожнини.

Виготовлені чавунні та сталеві зразки мали такі розміри: висота 50 мм, внутрішній діаметр 50 мм, товщина стінки 8 мм. Відповідно зовнішній діаметр зразків становив 66 мм. Таку товщину металевої стінки було обрано для наближення теплових умов формування виливків захисних модулів.

Вміст рідкого скла у рідкоскляній суміші змінювали від 4 до 16 г на 100 г кварцового піску з кроком 2 г. Масова частка рідкого скла у суміші, розрахована як відношення маси рідкого скла до загальної маси суміші, наведена в табл. 2.1.

Перерахунок вмісту рідкого скла у масову частку здійснювали відносно загальної маси рідкоскляної суміші за формулою:

$$w_{PC} = \frac{m_{PC}}{m_{\text{піску}} + m_{PC}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

де  $m_{PC}$  — маса рідкого скла, г;  $m_{\text{піску}}$  — маса кварцового піску, г

Таблиця 2.1 Склад рідкоскляного наповнювача для чавунних і сталевих зразків

| Позначення<br>чавунних<br>зразків | Позначення<br>сталевих<br>зразків | Маса піску, г | Маса рідкого<br>скла, г | Масова<br>частка<br>рідкого скла<br>у суміші, % |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------------------------------|
| 1-1                               | 1-2                               | 100           | 4                       | 3,8                                             |
| 2-1                               | 2-2                               | 100           | 6                       | 5,7                                             |
| 3-1                               | 3-2                               | 100           | 8                       | 7,4                                             |
| 4-1                               | 4-2                               | 100           | 10                      | 9,1                                             |
| 5-1                               | 5-2                               | 100           | 12                      | 10,7                                            |
| 6-1                               | 6-2                               | 100           | 14                      | 12,3                                            |
| 7-1                               | 7-2                               | 100           | 16                      | 13,8                                            |

Рідкоскляну суміш ущільнювали у пінополістиролових циліндрах трьома ударами на стандартному лабораторному копрі (рис. 2.2). Після цього суміш 40 с продували вуглекислим газом і пров'ялювали впродовж 24 годин. Потім до пінополістиролових зразків приклеювали ливникову систему і пензлем наносили на їхню поверхню протипригарну фарбу, уникаючи її потрапляння на поверхню стрижньової суміші. Після висихання протипригарного покриття модельні блоки формували у контейнерах сухим кварцовим піском.



Рисунок 2.2 Пінополістиролові циліндри з наповнювачем (суміш кварцового піску і рідкого скла)

Для формування використовували сухий сипкий кварцовий пісок. Після встановлення моделі у контейнерну опоку її засипали піском із подальшим ущільненням. Під час заливання форму вакуумували для видалення продуктів термодеструкції пінополістиролу та збереженню геометрії порожнини форми.

Заливання зразків виконували чавуном СЧ200 за температури  $1425^{\circ}\text{C}$  та сталлю 35Л за температури  $1610^{\circ}\text{C}$ . Після охолодження зразків до кімнатної температури їх відрізали від стояків.

### 2.3 Методика визначення роботи пробивання рідкоскляного наповнювача в дослідних зразках

Пробиваємість наповнювачів визначали за методикою, подібно до методу визначення вибивності [74], шляхом визначення роботи, необхідної для занурення бойка у наповнювач на всю його довжину.

Випробування проводили на стандартному лабораторному копрі. На нижньому кінці вертикального штока закріплювали боек діаметром 8 мм і довжиною 20 мм із загостреним кінцем [75]. Дослідний зразок (висота 50 мм, внутрішній діаметр 50 мм, товщина стінки 8 мм) установлювали на металеве кільце-підставку з центральним отвором діаметром 50 мм. Така схема забезпечувала вільний вихід зруйнованої частини наповнювача з нижнього боку зразка в міру занурення бойка та виключала додаткове підпирання наповнювача опорною поверхнею.

Випробування тривало до повного занурення бойка у наповнювач, як показано на рис. 2.3. Кількість ударів, необхідну для повного занурення бойка, фіксували для кожного зразка. Роботу пробивання визначали за формулою:

$$A = n \cdot m \cdot g \cdot h \quad (2.2)$$

$n$  – кількість ударів, необхідна для повного занурення бойка у наповнювач;

$m$  – маса вантажу, кг;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup> (9,81 м/с<sup>2</sup>);

$h$  – висота падіння вантажу, м.

Маса вантажу копра становила 6,35 кг, висота його падіння 0,05 м. Тобто робота одного удару копра складала приблизно 3,1 Дж.



Рисунок 2.3 Зразок на початку та наприкінці випробувань

Для кожного складу наповнювача випробовували три зразки, після чого розраховували середнє значення роботи пробивання.

Отримані результати використовували для оцінювання впливу вмісту рідкого скла на опір наповнювача пробиванню.

#### **2.4 Методика вимірювання товщини перехідного шару**

Товщину перехідного шару вимірювали за допомогою оптичного мікроскопа МПБ-2 при збільшенні  $\times 24$ . Мікроскоп оснащено окулярною шкалою з ціною поділки 0,1 мм.

Розрізані зразки встановлювали на предметний столик мікроскопа. На кожному зразку по всій висоті оболонки фіксували мінімальні та максимальні значення товщини перехідного шару.

Межі перехідного шару визначали візуально за зміною структури матеріалу:

- внутрішньою межею вважали край суцільної металевої оболонки;

- зовнішньою межею вважали ділянку, де структура рідкоскляного наповнювача переставала містити видимі включення металу.

Отримані результати використовували для оцінювання характеру зчеплення металевої оболонки з наповнювачем: більша товщина та рівномірність шару свідчили про кращу адгезію.

Загальний вигляд розрізаних чавунного та сталевих зразків, підготовлених для вимірювань, наведено на рис. 2.4

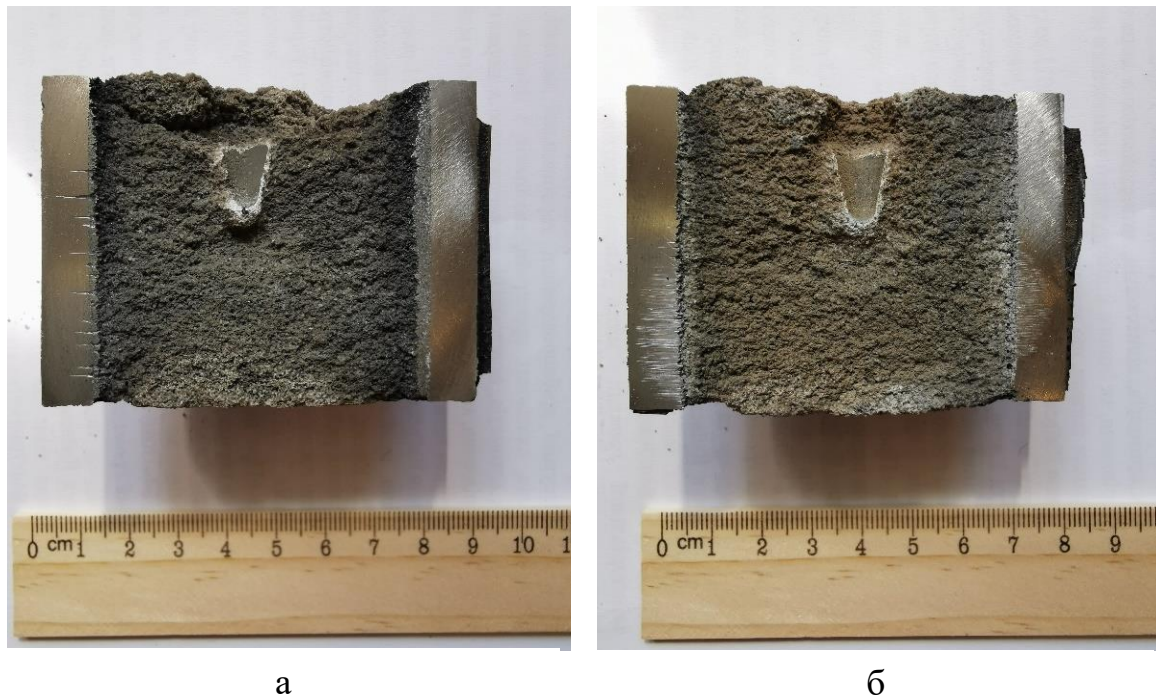


Рисунок 2.4 Загальний вигляд розрізаних зразків для вимірювання товщини перехідного шару: а - чавунний; б - сталевий.

## 2.5 Методика проведення металографічного аналізу

Металографічний аналіз виконували для дослідження будови перехідного шару, що формується на межі контакту металевої оболонки з інтегрованим рідкоскляним наповнювачем, а також для оцінки структурних змін у самому металі. Об'єктами дослідження були шліфи, виготовлені з фрагментів, вирізаних з боку живильника дослідних зразків. Кожен фрагмент

містив металеву оболонку, перехідний шар та частину неметалевого наповнювача.

Зразки для шліфів вирізали таким чином, щоб площа шліфа проходила через радіальний переріз і охоплювала всі характерні зони: металеву оболонку (чавун), перехідний шар і приповерхневу частину наповнювача. Підготовка шліфів включала механічне вирізання фрагментів, послідовне шліфування, полірування та, за потреби, хімічне травлення металевої складової для виявлення її мікроструктури.

Дослідження виконували у нетравленому та травленому станах за допомогою оптичного мікроскопа Leica при збільшеннях  $\times 50$  та  $\times 100$ . Травлення здійснювали 4 % розчином  $\text{HNO}_3$  у спирті.

У нетравленому стані оцінювали макроскопічні особливості зони контакту: суцільність з'єднання, наявність порожнин, тріщин або відшарувань, а також характер і глибину проникнення металу в поровий простір наповнювача.

Після травлення аналізували мікроструктуру металевої основи поблизу межі контакту та порівнювали її зі структурою металу на віддаленні від наповнювача. Особливу увагу приділяли структурним змінам у чавуні, що виникають безпосередньо біля поверхні контакту. Зокрема, оцінювали форму, характер розподілу та кількість графітових включень, а також наявність і співвідношення структурних складових металевої матриці - цементиту та перліту, оскільки ці параметри безпосередньо визначають механічні властивості металу в перехідній зоні.

## **2.6 Методика визначення мікротвердості металевої оболонки**

Вплив вмісту рідкого скла на локальні властивості чавунної металевої оболонки оцінювали методом вимірювання мікротвердості за Віккерсом. Дослідження виконували на приладі ПМТ-3.

Металографічні шліфи виготовляли з фрагментів дослідних зразків за методикою, описаною в підрозділі 2.5. Вирізані фрагменти розміщували в оправці та заливали протакрилом (акриловою пластмасою холодного твердіння) для зручності подальшої обробки (рис. 2.5). Поверхню шліфів послідовно шліфували й полірували до дзеркального блиску, не допускаючи появи дефектів, здатних спотворити форму відбитків.

Для оцінки градієнта властивостей мікротвердість визначали у трьох характерних зонах стінки оболонки:

- на відстані 0,5 мм від зовнішньої поверхні оболонки;
- у середині стінки металевої оболонки;
- безпосередньо у металевій основі перехідного шару.

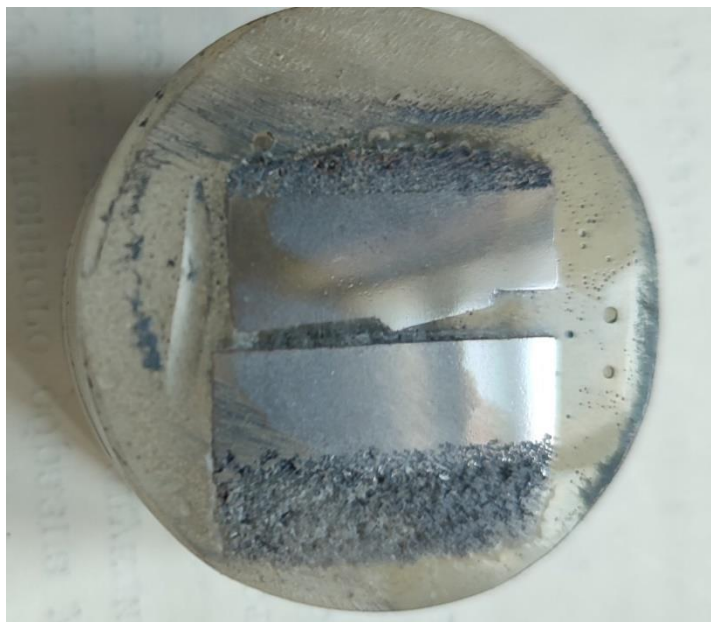


Рисунок 2.5 Загальний вигляд металографічних шліфів, закріплених в оправці протакрилом, для вимірювання мікротвердості металевої оболонки

Відбитки наносили вздовж умовної лінії, перпендикулярної до межі поділу, що дало змогу простежити зміну мікротвердості від основного металу до контактної зони. Відстань між сусідніми відбитками обирали такою, щоб

унеможливити їхній взаємний вплив. Умови навантаження та витримки індентора були однаковими для всіх зразків.

Значення мікротвердості розраховували за стандартною формулою для піраміди Віккерса:

$$HV = \frac{1854 \cdot P}{d^2}, \quad (2.3)$$

де  $P$  - навантаження на індентор;

$d$  - середнє арифметичне довжин обох діагоналей відбитка, мкм.

У дослідженнях навантаження на індентор становило  $P = 100$  гс. Довжину діагоналі  $d$  визначали множенням кількості поділок окуляр-мікрометра  $N$  на ціну поділки:

$$d = N \cdot 0,31 \text{ мкм.}$$

Отримане значення мікротвердості  $HV$  виражали у кгс/мм<sup>2</sup>. Для подання результатів у системі SI виконували переведення за співвідношенням:

$$1 \text{ кгс/мм}^2 \approx 9,8 \text{ МПа.}$$

Для кожної зони розраховували середнє значення мікротвердості.

## 2.7 Методика випробувань на стиск

Випробування на стиск проводили для кількісного оцінювання впливу рідкоскляного наповнювача на несучу здатність трубчастих зразків із сірого чавуну СЧ200.

Об'єктами випробувань були три типи зразків:

1. Чавунний трубчастий зразок з інтегрованим рідкоскляним наповнювачем;
2. Порожнистий чавунний трубчастий зразок без наповнювача;
3. Окремий рідкоскляний наповнювач у вигляді суцільного циліндра, попередньо сформований у пінополістироловій оболонці, що відтворювала внутрішню порожнину чавунного зразка.

Чавунні зразки (типи 1 та 2) мали однакові геометричні параметри: висоту 50 мм, зовнішній діаметр 66 мм і товщину стінки 8 мм. Суцільний циліндричний наповнювач (тип 3) мав діаметр 50 мм і висоту 50 мм.

Випробування виконували на гідравлічному пресі марки ОКС-1671Р з максимальним зусиллям 40 тс. Зразки встановлювали на бічну поверхню на нижню плиту преса, центруючи відносно осі навантаження (рис. 2.6).

Навантаження збільшували до повного руйнування зразка. Руйнівне навантаження у кгс визначали прямо за показаннями манометра преса, попередньо перевіривши їх з урахуванням площі плунжера.

Розрахунок руйнівного зусилля ( $F$ , кгс), яке безпосередньо діяло на зразок, здійснювали за формулою:

$$F = p \cdot S_{\text{пл}}, \quad (2.4)$$

де  $p$  — показ манометра в момент руйнування, кгс/см<sup>2</sup>;  $S_{\text{пл}}$  — робоча площа плунжера преса, що становить 88,25 см<sup>2</sup> (для діаметра 106 мм).

Для кількісної оцінки ефекту зміцнення обчислювали коефіцієнт відносного підсилення несучої здатності ( $K$ ):

$$K = \frac{F_{\text{з нап.}}}{F_{\text{без нап.}}}, \quad (2.5)$$

де  $F_{\text{з нап.}}$  та  $F_{\text{без нап.}}$  — руйнівні зусилля для зразків з наповнювачем та без нього, відповідно.



а



б

Рисунок 2.6 Загальний вигляд проведення випробувань на стискання: а – гідравлічний прес ОКС-1671Р; б – розміщення трубчастого зразка для випробування

Випробування окремого циліндричного рідкоскляного наповнювача проводили як допоміжні для оцінювання його власного опору руйнуванню та подальшого пояснення внеску наповнювача у підвищення несучої здатності системи «металева оболонка — неметалевий наповнювач».

## **2.8 Методика термоконтролю процесу прогрівання рідкоскляного наповнювача**

Метою термоконтролю було отримання експериментальних даних про термочасові параметри прогрівання та охолодження рідкоскляного наповнювача в умовах контакту з чавунним розплавом. Ці дані

використовували для оцінювання реального теплового стану наповнювача та зіставлення з результатами математичного моделювання теплових процесів.

Дослідження проводили на циліндричному чавунному виливку трубчастого типу (висота 50 мм, зовнішній діаметр 66 мм, товщина стінки 8 мм). Його внутрішню порожнину заповнювали рідкоскляним наповнювачем, виготовленим згідно з методикою підрозділу 2.2. Виливок формували у сухій піщаній формі за моделями, що газифікуються, у контейнерній опоці з вакуумуванням формувального середовища. Чавун заливали за температури 1425-1430 °С.

Температуру реєстрували у двох точках наповнювача, розташованих на одній горизонтальній осі: у геометричному центрі (Т1) та на половині радіуса від центра (Т2). Це дозволило зафіксувати градієнт температур у радіальному напрямку та кількісно оцінити перепад температур між центральною та проміжною зонами наповнювача.

Вимірювання виконували хромель-алюмелевими термопарами типу К. Для захисту від впливу високотемпературного середовища, можливого контакту з розплавом і механічних пошкоджень робочі спаї термопар поміщали у кварцові захисні ковпачки.

Реєстрацію сигналів здійснювали автоматизованим вимірювальним комплексом на базі контролера «Акон» із відповідним програмним забезпеченням. Комплекс забезпечував приймання сигналів від термопар, їх перетворення та запис температурних даних на ПК у реальному часі.

Запис температури розпочинали до заливання металу у форму та завершували після охолодження центральної зони наповнювача до температури 300-400 °С. За отриманими даними будували термограми для кожної контрольної точки. Кількісний аналіз включав визначення

максимальної досягнутої температури, часу її досягнення та середньої швидкості охолодження на різних часових інтервалах.



Рисунок 2.8 Регістральний комплекс і дослідні зразки з

встановленими термометрами



Рисунок 2.9 Проведення термоконтролю під час заливання чавунного зразка з рідкоскляним наповнювачем

## **2.9 Допоміжні інструменти обробки текстової інформації**

Для технічного редагування окремих фрагментів тексту використовувалася програма штучного інтелекту Claude 4.5 Naiku. Період використання: березень – травень 2026 року.

Тип запитів до програми:

- перепарафразування окремих речень та абзаців для усунення стилістичних недоліків та досягнення логічності викладу;
- перевірка граматичної та синтаксичної узгодженості тексту.

Фрагменти тексту які були згенеровані програмою перевірені та відкориговані автором, і використовуються тільки як допоміжний матеріал. Наукові результати, висновки та фактичні дані, наведені в роботі, належать автору та були отримані самостійно під час проведення дослідження.

## **Висновки до розділу 2**

1. Обґрунтовано вибір вихідних матеріалів для одержання бінарних виливків системи «металева оболонка - неметалевий наповнювач». Як матеріали оболонки використано залізовуглецеві сплави, а як наповнювач рідкоскляну суміш на основі кварцового піску та натрієвого рідкого скла, що забезпечує можливість формування внутрішнього неметалевого об'єму у виливку.

2. Розроблено методику виготовлення дослідних зразків за моделями, що газифікуються, яка передбачає попереднє розміщення та ущільнення рідкоскляного наповнювача у внутрішній порожнині пінополістиролової моделі з подальшим формуванням металевої оболонки під час заливання розплаву.

3. Визначено послідовність підготовки рідкоскляного наповнювача з різним вмістом рідкого скла, що дає змогу дослідити вплив кількості зв'язувального компоненту на технологічну поведінку наповнювача, його

стійкість до пробивання та формування контактної зони з металевою оболонкою.

4. Запропоновано методику оцінювання опору рідкоскляного наповнювача механічному руйнуванню шляхом визначення роботи пробивання дослідних зразків. Такий підхід дозволяє кількісно порівнювати вплив складу наповнювача на його міцнісні характеристики після теплового впливу під час лиття.

5. Сформовано комплекс методик для дослідження структури та властивостей зразків після заливання, який включає підготовку металографічних шліфів, аналіз контактної зони «металева оболонка — наповнювач», вимірювання товщини перехідного шару та визначення мікротвердості металевої оболонки.

6. Обґрунтовано використання відповідного лабораторного й вимірювального обладнання для контролю геометричних параметрів зразків, дослідження мікроструктури, визначення мікротвердості та оцінювання механічної поведінки рідкоскляного наповнювача.

7. Наведені методики забезпечують відтворюваність експериментальних досліджень і створюють основу для подальшого аналізу впливу складу неметалевого наповнювача на формування перехідної зони, властивості металевої оболонки та працездатність бінарного виливка.

8. Для прозорості підготовки текстових матеріалів роботи зазначено використання допоміжних інструментів технічного редагування. При цьому наукові результати, фактичні дані, їх аналіз та висновки сформовано автором самостійно.

## **РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

### **3.1 Передумови формування перехідного шару та збереження міцності неметалевого наповнювача**

Для досягнення досконалих результатів щодо суміщення компонентів на межі металу з наповнювачем необхідне виникнення механічного зчеплення та протікання процесу фізико-хімічної взаємодії на межах їх контакту.

Однією з основних умов формування виливків з неметалевим наповнювачем є змочування наповнювача розплавом і заповнення їм пор, капілярів та інших пустот.

Змочування розплавом призводить до тісного контакту фаз – необхідної умови для розвитку процесів хімічної взаємодії на межі розділу [76, 77, 78].

Основними факторами технології суміщення компонентів системи для досягнення оптимальної структури і експлуатаційних властивостей є процеси дифузійної взаємодії, що протікають між металом та наповнювачем. Причому формування контактної зони відбувається по залежностям, що визначаються швидкостями реакцій і дифузійними процесами елементів [16, 46, 76, 79].

Тож для одержання міцного перехідного шару між металом та наповнювачем необхідно забезпечити:

1. Змочуваність на межі металева оболонка – наповнювач.
2. Попередити утворення нестабільних хімічних сполук або їх шарів надмірної товщини.
3. Запобігання хімічної ерозії.
4. Запобігання крихкості шару на поверхні контакту зі сплавом оболонки.
5. Утворення міцного зчеплення на межі суміщення фаз при використанні рідкоскляних сумішей з високою залишковою міцністю.

При використанні сумішей на основі кварцового піску, тісний контакт фаз можна забезпечити механічним зв'язком, який виникає за рахунок проникнення розплавленого металу в пористість керамічної суміші. Фактично на межі фаз треба забезпечити утворення зони локального проникнення металу в пористість наповнювача на глибину не менше, ніж діаметр зерна формувального піску (0,1...0,315 мм).

У спрощеному вигляді умову проникнення розплаву в пори наповнювача можна оцінювати через співвідношення гідростатичного, капілярного та газового тиску.

Глибину проникнення металу в пористість наповнювача може бути знайдено з виразу:

$$h = H - \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot r}, \quad (3.1)$$

де  $h$  – глибина проникнення металу в пористість суміші;  $H$  – гідростатичний напір сплаву в формі;  $\sigma$  – поверхневий натяг сплаву;  $\theta$  – крайовий кут змочування;  $\rho$  – густина сплаву;  $r$  – радіус пор.

Також тісний контакт на межі фаз виникає в результаті фізико-хімічної взаємодії на межі металу з рідкоскляним наповнювачем, в результаті складних реакцій між металом вилівка, його оксидами та матеріалом керамічного елементу.

На відміну від механічного зв'язку зерна піску в шарі, що прогрівається, зв'язуються головним чином продуктами хімічних реакцій, які протікають при високих температурах, переважно силікатами. Оксиди заліза добре змочують оксиди кремнію і під дією капілярного тиску проникають у пори суміші, вступаючи в реакцію з кремнеземом.



Також можливе протікання аналогічної реакції між окислом мангану та кремнеземом:



Відносно легкоплавкі силікатні фази, що можуть утворюються в результаті цих реакцій, після затвердіння цементують зерна піску з чавуном у міцний прошарок на межі «металева оболонка-наповнювач».

Для прогнозування формування перехідного шару було проведено теоретичний аналіз можливих реакцій між оксидами металу та кремнеземною складовою наповнювача [16].

Для оцінки ймовірності протікання хімічних реакцій між компонентами розплаву та наповнювачем ( $\text{SiO}_2$ ) було розраховано стандартну зміну енергії Гіббса ( $\Delta G^\circ$ ) для реакцій утворення силікатів, використовуючи термодинамічні дані з довідника [80]. Початкова температура розплаву, що надходить у форму, становила  $1430^\circ\text{C}$  ( $1703\text{ K}$ ).

Розрахунок  $\Delta G^\circ$  для кожної реакції проводили за формулою:  
 $\Delta G^\circ = \Delta G_f(\text{силікату}) - [\Delta G_f(\text{оксиду металу}) + \Delta G_f(\text{SiO}_2)]$ .

Значення  $\Delta G_f$  для необхідних сполук при  $1703\text{ K}$ , отримані шляхом інтерполяції даних [80], наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 Значення  $\Delta G_f$  для хімічних сполук при  $1430^\circ\text{C}$  ( $1703\text{ K}$ )

| Хімічна сполука  | $\Delta G_f$ при $1430^\circ\text{C}$ ( $1703\text{ K}$ ),<br>кДж/моль |
|------------------|------------------------------------------------------------------------|
| FeO              | $\sim -163,9$                                                          |
| MnO              | $\sim -257,2$                                                          |
| $\text{SiO}_2$   | $\sim -610,2$                                                          |
| $\text{FeSiO}_3$ | $\sim -834,5$                                                          |
| $\text{MnSiO}_3$ | $\sim -1113,0$                                                         |

Результати розрахунку  $\Delta G^\circ$ :

для утворення  $\text{FeSiO}_3$ :

$$\Delta G^\circ \sim -834,5 - [(-163,9) + (-610,2)] \approx -60,4 \text{ кДж/моль},$$

для утворення  $\text{MnSiO}_3$ :

$$\Delta G^\circ \sim -1113,0 - [(-257,2) + (-610,2)] \approx -245,6 \text{ кДж/моль.}$$

Обидві розраховані величини  $\Delta G^\circ$  мають від'ємні значення, що свідчить про термодинамічну можливість протікання даних реакцій за даних умов. При цьому реакція утворення родоніту ( $\text{MnSiO}_3$ ) характеризується значно більшим від'ємним значенням  $\Delta G^\circ$ , що вказує на її вищу ймовірність та стабільність сполуки порівняно з феросилітом.

Оскільки в чавуні СЧ200 є достатня кількість заліза та марганцю, а наповнювач багатий на  $\text{SiO}_2$ , створюються сприятливі умови для протікання реакцій утворення силікатів. На основі проведений аналізу ймовірна можливість утворення силікатних сполук ( $\text{FeSiO}_3$  та  $\text{MnSiO}_3$ ) на межі розділу фаз «чавун–наповнювач», що має сприяти зміцненню перехідного шару.

Слід зазначити, що при використанні неметалевих наповнювачів на основі кварцового піску, недостатньо тільки забезпечення міцного зв'язку на межі фаз, необхідно ще використання в'язучих матеріалів, які під дією температури розплавленого металу не руйнуються, а при охолодженні виливка збільшують міцнісні характеристики наповнювача.

При використанні рідкоскляної суміші, зону між металом та пористою структурою суміші, яка сформована за рахунок часткового проникнення розплаву або його оксидів у міжзерновий простір кварцового піску слід розглядати як перехідний шар.

Оскільки в нашій роботі важливим є збереження міцності самого наповнювача після теплової дії розплаву, було використано залежність залишкової міцності формувальних сумішей із основними неорганічними зв'язувальними компонентами від температури їх прогрівання (рис.3.1.) [14].

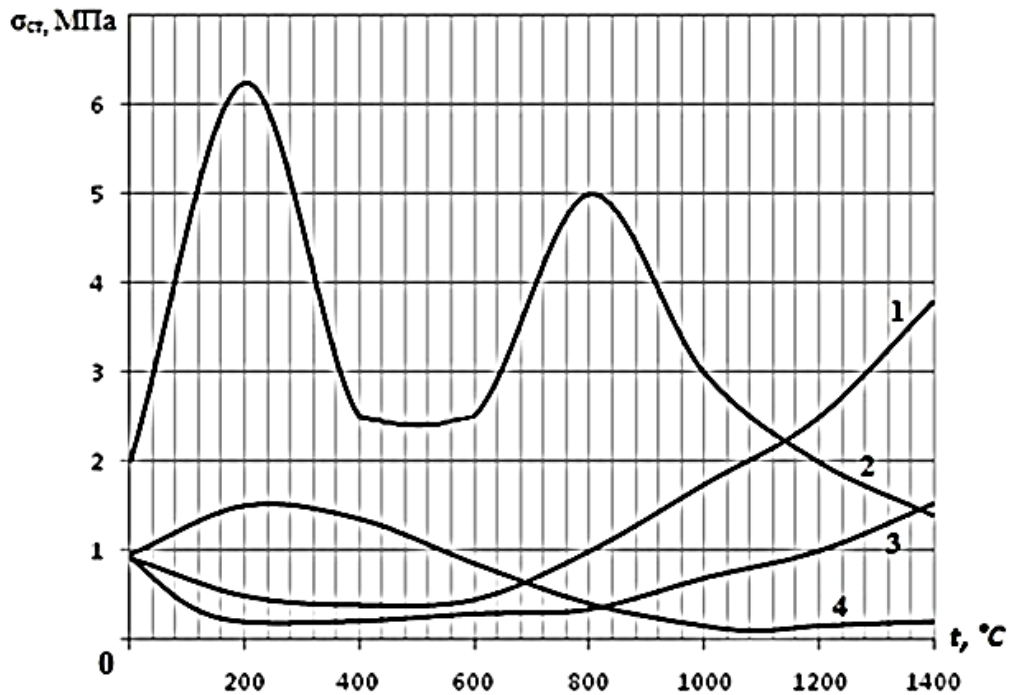


Рисунок 3.1 Зміна залишкової міцності формувальних сумішей із основними неорганічними зв'язувальними компонентами залежно від температури їх прогрівання:

- 1 – суміш з рідким склом і ферохромовим шлаком;
- 2 – суміш з рідким склом, зміцнена  $\text{CO}_2$ ;
- 3 – РСС з рідким склом;
- 4 – піщано-глиняста суміш.

Зміни залишкової міцності сумішей наведені на рис.3.1. також можна пояснити тим, що при зміцненні відбувається часткове видалення води із суміші шляхом нагрівання або в'ялення, рідке скло перетворюється на склоподібний силікат, який сприяє формуванню високої міцності ущільненій рідкоскляній суміші. Найбільша міцність на стискання досягається при нагріванні до температури 200 °C [81], а з подальшим підвищенням температури міцність зменшується. Проте при температурах нагрівання 1000-1200 °C відбувається вторинне підвищення міцності рідкоскляних сумішей. Це пояснюється тим, що рідкоплавкі сполуки, що утворюються між  $\text{Na}_2\text{O}$  і  $\text{SiO}_2$ ,

огортають зерна піску і при охолодженні переходять у тверде тіло, зв'язуючи зерна у тверду масу [53, 74, 81].

Варто зазначити, що силікати натрію, які входять до складу рідкоскляних сумішей, мають температуру плавлення близько 800 °С [53,74]. Тому вторинне підвищення міцності може розпочинатися вже при цій температурі.

Такий характер зміни міцності підтверджується також даними інших досліджень, якими встановлено, що другий максимум обумовлений утворенням міцного силікатного каркаса при плавленні рідкого скла [48, 82], а також те, що додавання рідкого скла знижує температуру спікання кварцового піску приблизно до 1200 °С [83], та призводить до інтенсифікації процесів утворення спіклих конгломератів у зазначеному інтервалі температур. Також відмічається, що висока залишкова міцність при температурах понад 800 °С також може бути пов'язана з капілярним, а не лише плівковим розподілом зв'язувального, який створює неруйнівний каркас[48].

Відповідно, з огляду на наведене, підвищену залишкову міцність, і, відповідно, знижену вибивність при температурі вище ніж 800 °С мають суміші №1 і № 3 з рідким склом (рис. 3.1).

Для звичайних ливарних стрижнів така властивість є недоліком, однак у досліджуваній системі підвищена залишкова міцність рідкоскляної суміші, зокрема суміші № 3 на рис. 3.1, є необхідною для збереження цілісності неметалевого наповнювача у складі бінарного виливка.

### 3.2 Математична модель тепломасообмінних процесів

Моделювання проводили на моделі порожнистого сегмента модуля, який формували в контейнерній формі з сухим кварцовим піском за технологією ЛГМ (рис. 3.2).

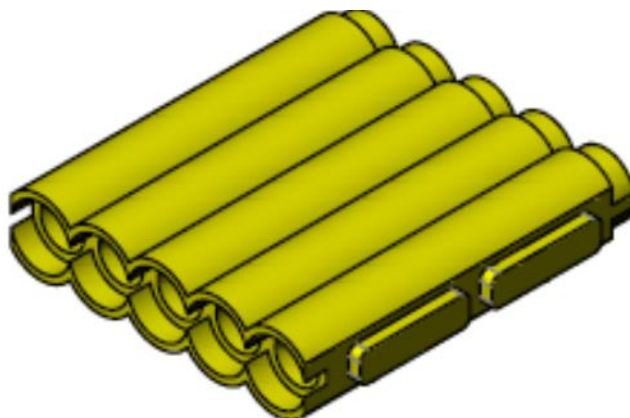


Рисунок 3.2 Загальний вигляд сегмента модуля

В якості наповнювача було обрано рідкоскляну суміш та керамзит. Наповнювач із керамзиту використовували для порівняння впливу теплофізичних властивостей на характер прогрівання та формування перехідного шару.

Теплофізичні характеристики матеріалів, які використовувались при розрахунках, наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Теплофізичні характеристики матеріалів для розрахунків

| Матеріал<br>Характеристики         | Чавун<br>СЧ200 | Керамзи<br>т | РСС<br>кількості 6<br>% від маси<br>піску | Кварцови<br>й пісок |
|------------------------------------|----------------|--------------|-------------------------------------------|---------------------|
| Щільність, кг/м <sup>3</sup>       | 7200           | 670          | 2700                                      | 1600                |
| Питома теплоємність,<br>кДж/(кг·К) | 457            | 912          | 1980                                      | 1716,5              |
| Теплопровідність, Вт/(м·К)         | 55,7           | 0,15         | 2,58                                      | 0,963               |

|                                  |      |    |    |    |
|----------------------------------|------|----|----|----|
| Теплота фазового переходу, Дж/кг | 260  |    |    |    |
| Температура ліквідус, °C         | 1250 |    |    |    |
| Температура солідус, °C          | 1175 |    |    |    |
| Початкова температура, °C        | 1430 | 20 | 20 | 20 |

Розрахунки проводили для центрального перерізу виливка. Схему області дослідження представлено на рис.3.3.

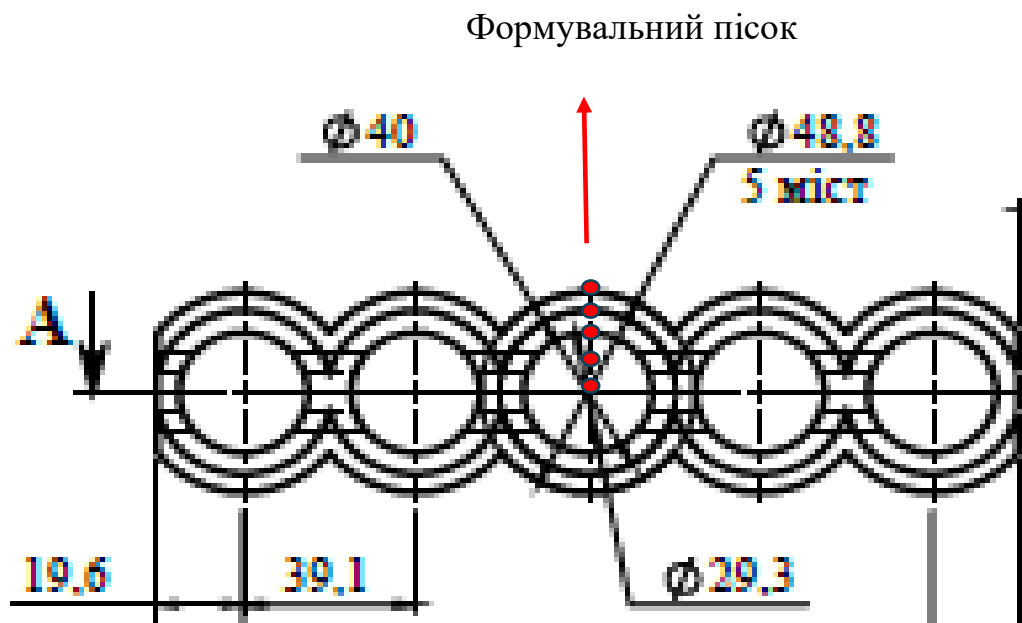


Рисунок 3.3 Схема розрахункової області (центрального перерізу виливка) з позначенням контрольних точок: 1 - центр наповнювача; 2 -  $\frac{1}{2}$  радіуса неметалевої фази (наповнювача); 3 - межа розділу фаз «метал–наповнювач»; 4 - середина стінки виливка ( $\frac{1}{2}$  товщини); 5 - зовнішня поверхня виливка (межа з сухим формувальним піском).

Для прогнозування термочасових параметрів під час формування виливків із неметалевим наповнювачем використовували методику математичного моделювання теплових процесів, наведену в роботі [16]. Фізико-математична постановка задачі базується на моделюванні процесів формування литих композиційних матеріалів, викладених у роботах [61, 63, 64, 65].

Основу моделі становить узагальнене рівняння теплопровідності для багатокомпонентного неоднорідного середовища з урахуванням виділення прихованої теплоти кристалізації. Враховували зміну теплового стану металевої оболонки, неметалевого наповнювача та ливарної форми в процесі заливання, охолодження і твердіння виливка.

Використали рівняння теплопровідності для багатокомпонентного середовища з урахуванням виділення прихованої теплоти кристалізації:

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = \text{div}(\lambda_i \nabla T), \quad (3.4)$$

де:  $W_i = \int_0^T c_i \cdot \gamma_i \cdot dT + \kappa_i \gamma_i \eta_i(T)$  - ентальпія;  $c_i, \gamma_i, \lambda_i$  - теплоємність, густина та коефіцієнт теплопровідності відповідно, що залежать від температури та координат;  $\kappa_i$  - прихована теплота фазового переходу;  $\eta_i$  - об'ємна доля рідкої фази;  $t$  - поточний час;  $T$  - поточна температура;  $i = 1, \dots, n$  - кількість середовищ.

**Граничні та початкові умови.** На зовнішніх границях області інтегрування рівняння (1) передбачали ідентичні умови теплообміну, що забезпечувало спрямований характер тверднення виливка. Припускали, що теплообмін із зовнішнім середовищем відбувається за рахунок конвекції:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \alpha_k (T - T_{\text{ср}}), \quad (3.5)$$

де  $\alpha_k$  - коефіцієнт конвективного теплообміну з поверхні форми,  $T_{\text{ср}}$  - температура середовища, що оточує форму.

На границі «метал–наповнювач» задавалася умова неідеального теплового контакту, що описується двома рівняннями:

умова збереження теплового потоку на границі розділу –

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_{\Gamma}, \quad (3.6)$$

стрибок температури, пропорційний тепловому потоку –

$$T_1 - T_2 = R_c \cdot \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} \right), \quad (3.7)$$

де  $R_c$  - контактний термічний опір, що враховує мікрошорсткість, наявність оксидних плівок або прошарків зв'язувального компонента; 1 - метал; 2 - неметалева фаза.

В початковий момент часу вважали заданими температуру металу, що заливається (розплав чавуну 1430 °C), ливарної форми та неметалевої фази (20 °C).

Для вирішення сформульованої задачі було використано чисельний метод кінцевих різниць.

Теплофізичні характеристики для неметалевої фази, яка має неоднорідну у випадку рідкоскляної суміші або пористу будову при керамзиті, як порівняльного варіанта, задавалися як ефективні з урахуванням складу, пористості та об'ємного співвідношення її компонентів. Металеву оболонку та неметалевий наповнювач у розрахунковій області розглядали окремо, та враховували їх взаємодію через граничні умови на межі поділу «металева оболонка-наповнювач».

Ефективна теплопровідність неметалевої фази може бути оцінена за формулою:

$$\tilde{\lambda} = \langle \lambda \rangle - \frac{V_1 V_2 (\lambda_1 - \lambda_2)^2}{3 \langle \lambda \rangle + (V_2 - V_1)(\lambda_1 - \lambda_2)}, \quad (3.8)$$

де  $\lambda_1, \lambda_2$ - коефіцієнти теплопровідності складових неметалевої фази;  $V_1, V_2$ - їх об'ємні частки. Металева оболонка та неметалевий наповнювач у моделі розглядалися як окремі області, тому наведене усереднення застосовували лише для опису ефективних теплофізичних властивостей наповнювача.

Ефективні густина  $\tilde{\rho}$  та теплоємність  $\tilde{c}$  визначаються як середньозважені величини:

$$\tilde{\rho} = V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2, \quad (3.9)$$

$$\tilde{c} = \frac{V_1 \rho_1 c_1 + V_2 \rho_2 c_2}{\tilde{\rho}}. \quad (3.10)$$

1. На межі поділу «метал–газовий прошарок–модель» враховували специфіку ЛГМ-процесу. Враховуючи що під час заливання розплаву відбувається термодеструкція пінополістиролової моделі, модель теплопереносу було доповнено умовами за яких тепловий потік від металу частково витрачається на випалювання і газифікацію пінополістиролової моделі:

$$q_{\text{газ}} = \rho_{\text{ППС}} L_{\text{газ}} v_{\text{фр}}, \quad (3.11)$$

де  $\rho_{\text{ППС}}$  – густина пінополістиролу;  $L_{\text{газ}}$  – питома теплота газифікації пінополістиролової моделі;  $v_{\text{фр}}$  – швидкість руху фронту газифікації.

Для врахування інтенсифікації теплопереносу в рідкому металі зумовленої гравітаційною конвекцією, використовували підхід ефективної теплопровідності. Для порівняльного варіанта з керамзитовим наповнювачем додатково враховували можливість посилення конвективного перенесення теплоти під час проходження розплаву крізь пористу структуру наповнювача. У цьому випадку коефіцієнт теплопровідності рідкого металу  $\lambda_{\text{м,рід}}$  замінювали на ефективний коефіцієнт  $\lambda_{\text{еф}}$ :

$$\lambda_{\text{еф}} = \xi \lambda_{\text{м,рід}}, \quad (3.12)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт, що залежить від інтенсивності конвекції.

Сформульована задача (3.4)–(3.12) є нелінійною та взаємозв'язною. Така задача у загальному випадку не має простого аналітичного розв'язку, тому для її розв'язання застосовуються чисельні методи. У даній роботі

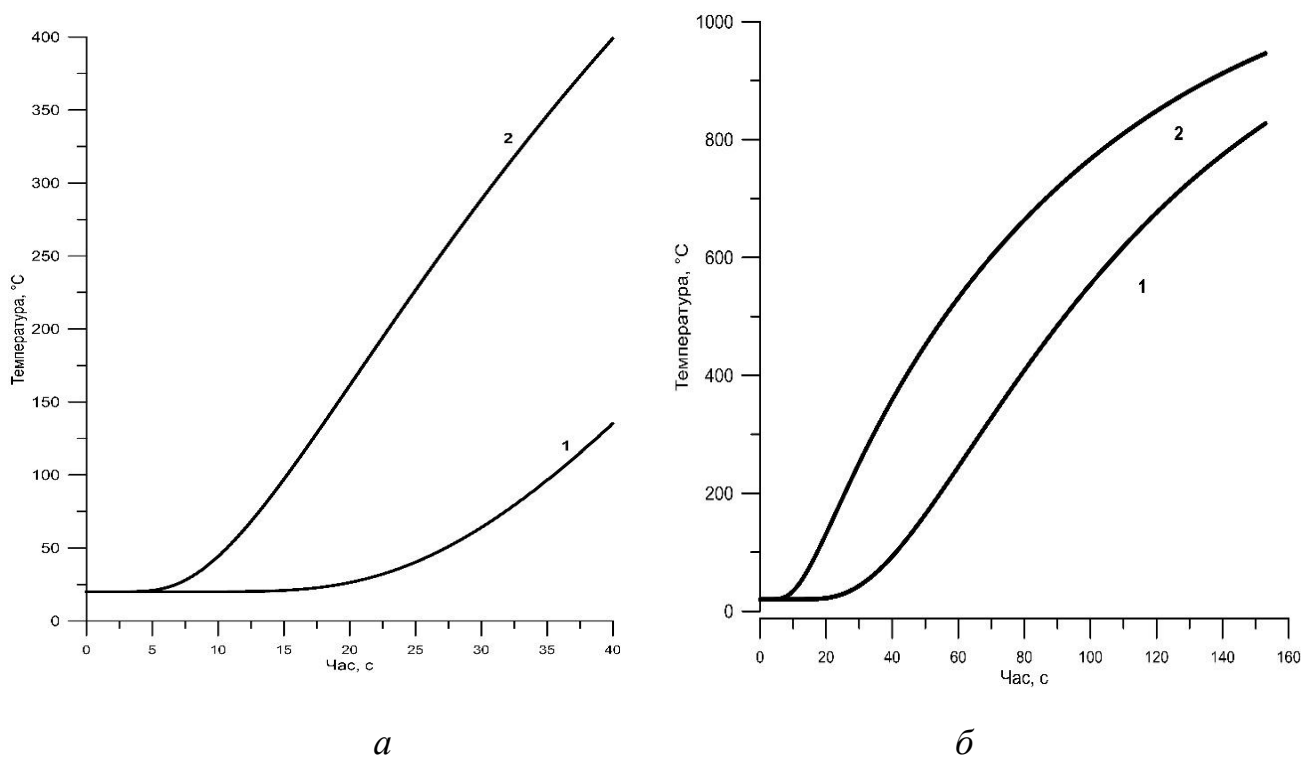
використовується метод скінченних різниць на нерівномірних сітках з ітераційним узгодженням розв'язку на внутрішніх границях.

Адекватність математичної моделі перевіряли шляхом порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними, отриманими при термометричних дослідженнях чавунних зразків з рідкоскляним наповнювачем. Результати збігу розрахункових та експериментальних даних наведено у п.3.4.

Розроблена математична модель є основою для проведення комп'ютерного моделювання з метою аналізу впливу температури заливки, геометрії виливка та вмісту наповнювача на теплові поля, кінетику твердіння металевої оболонки, прогрівання неметалевої фази та умови формування перехідного шару.

### 3.3 Результати математичного та комп'ютерного моделювання теплових процесів

Для оцінки впливу типу неметалевого наповнювача на теплові режими формування виливка було проведено комп'ютерне моделювання процесів



залиття, твердіння та охолодження сегмента модуля з чавуну СЧ200. Розрахунки виконували за методикою, описаною в підрозділі 3.2, для двох типів наповнювачів – рідкоскляної суміші (РСС) та керамзиту.

Рисунок 3.4 Зміна температури в часі при формуванні виливка з наповнювачами: *а* — рідкоскляна суміш; *б* — керамзит: 1 — по центру неметалевої фази; 2 —  $\frac{1}{2}$  радіуса неметалевого наповнювача.

На рис. 3.4 представлено зміну температури в часі у двох точках всередині наповнювача: крива 1 – температура в центрі неметалевої фази; крива 2 – температура на відстані  $\frac{1}{2}$  радіуса неметалевої фази від його центру [16].

За результатами аналізу цих кривих встановлено, що для рідкоскляної суміші спостерігається повільний прогрів центру наповнювача, ніж у зоні на половині радіусу, що пов'язано із переважно кондуктивним характером передачі теплоти всередині наповнювача. Завершення тверднення металевої оболонки відбувається приблизно за 40 с, але наповнювач продовжує поглинати тепло від металу. В цей момент центр наповнювача прогрівається до 125 °С, а на відстані пів радіуса близько 400 °С. Перепад температури всередині рідкоскляної суміші між зазначеними точками становить близько 275 °С.

Для керамзиту, як видно з рис.3.4. б, температура в центрі наповнювача зростає значно інтенсивніше, через наявність порожнин між гранулами, через які під час заливання можливе проникнення розплаву та конвективне перенесення теплоти. У цьому випадку тверднення виливка триває довше, ніж для РСС та становить близько 160с. Температура в центрі досягає приблизно 800 °С, на половині радіуса 950 °С. Перепад температур становить лише 150 °С.

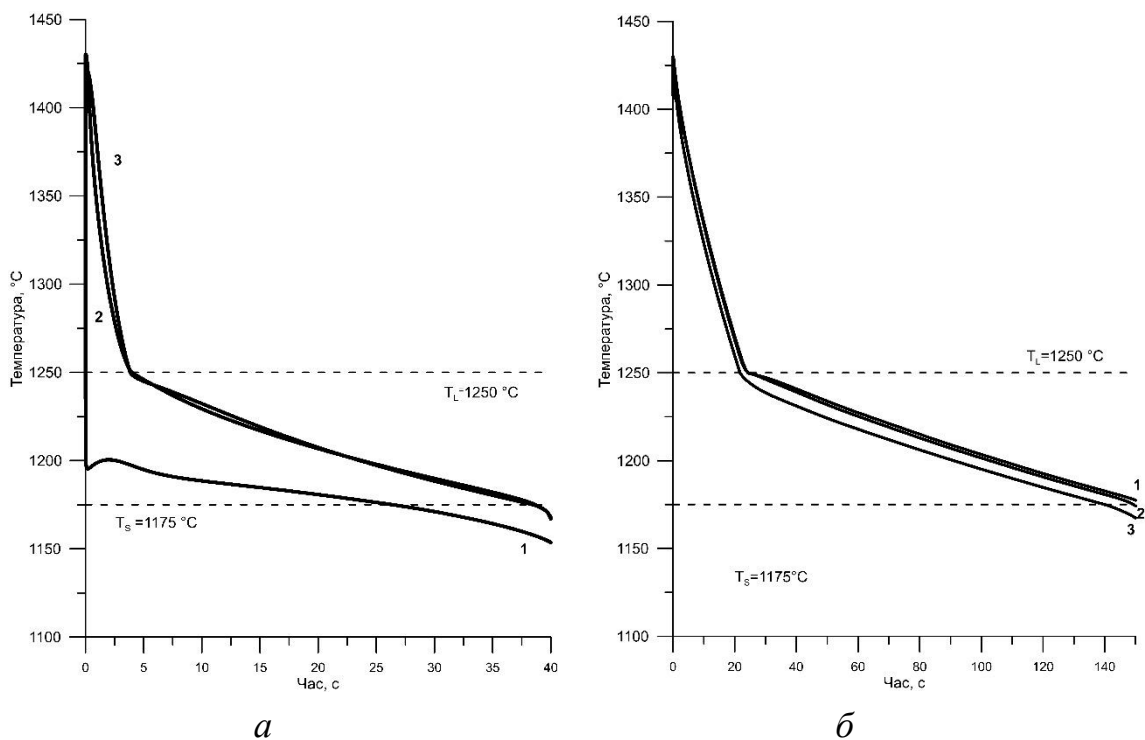


Рисунок 3.5 Зміна температури при формуванні виливка вздовж радіуса для різних неметалевих фаз: *а* — рідкоскляна суміш; *б* — керамзит: 1 — на межі з наповнювачем; 2 —  $\frac{1}{2}$  товщини виливка; 3 — на межі з формою

На **рис. 3.5** показано зміну температури в часі у різних точках металевої оболонки по її товщині: крива 1 — температура на межі розділу «метал—наповнювач»; крива 2 — температура в середині стінки виливка ( $\frac{1}{2}$  товщини); крива 3 — температура на зовнішній поверхні виливка (межа з ливарною формою) [16].

Для зразка з рідкоскляною сумішшю, рис. 3.5, а, у перші секунди після заливання на межі контакту чавунної оболонки з наповнювачем спостерігається різке зниження температури металу приблизно до 1190 °С. Початковий перепад температури становить близько 150 °С. Рідкоскляна суміш у цьому випадку як теплопоглинальне середовище інтенсивне відбирає тепло від металевої оболонки. Через 25 с температура металу у точці на межі з наповнювачем (крива 1) досягає температури солідус. Температура в середині стінки та на зовнішній межі з формою вирівнюється приблизно через 5 с, що створює передумови для тверднення металу від межі з наповнювачем до межі з формою.

При використанні керамзиту, рис. 3.5, б, різкого теплового бар'єру на межі металу з наповнювачем не виникає. Наповнювач прогрівається рівномірніше за рахунок конвективного перенесення теплоти в порожнини між гранулами керамзиту. Перепад температури по товщині стінки не перевищує 5–10°С, тому твердіння відбувається практично одночасно по всьому об'єму металевої оболонки.

Отримані результати моделювання показують, що тип неметалевого наповнювача визначає характер тепломасообміну під час формування виливка. Рідкоскляна суміш забезпечує інтенсивне відведення теплоти у зоні контакту металу з наповнювачем в результаті формується значний температурний перепад у наповнювачі, тоді як керамзит сприяє рівномірному прогріву системи. Відмінності в температурному режимі визначають умови формування контактної зони між металом та наповнювачем і можуть впливати на властивості перехідного шару, що розглядається у підрозділах 4.3.-4.4.

**3.4 Порівняння результатів математичного моделювання з експериментальними даними та визначення температурно-часових умов для термічного зміцнення наповнювача**

Для перевірки адекватності математичної моделі та перевірки досягнення наповнювачем температур вторинного підвищення міцності виконано термоконтроль зразка із чавунною оболонкою та рідкоскляним наповнювачем.

Температуру реєстрували у двох контрольних точках за допомогою термопар: на відстані  $\frac{1}{2}$  радіуса наповнювача та в його центрі.

Реєстрацію показань термопар здійснювали протягом усього основного періоду охолодження виливка.

Загальна тривалість запису становила близько 2 год, упродовж яких температура в контрольних точках наповнювача знизилася приблизно до 300 °С.

Повну температурну залежність наведено на рис. 3.6

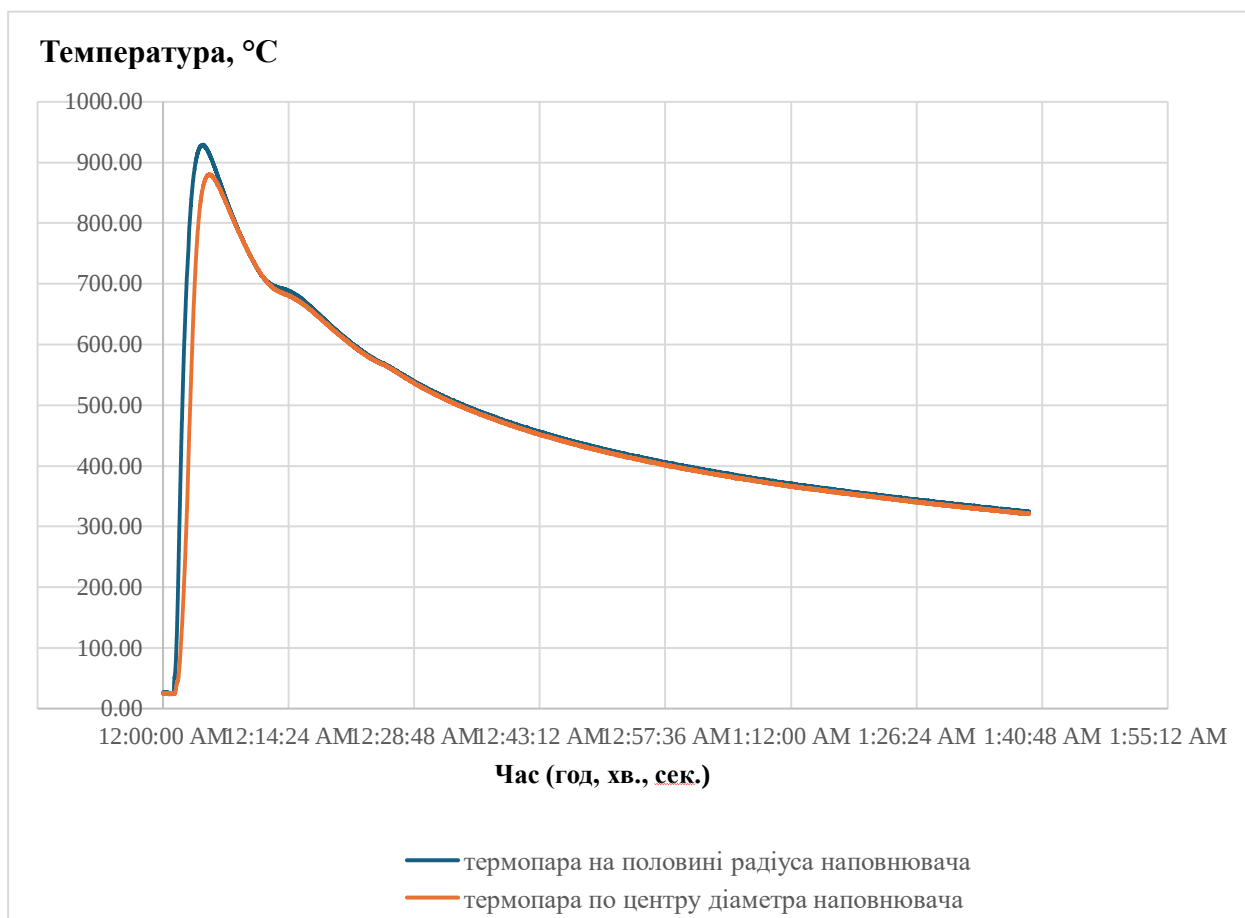


Рисунок 3.6 Повна термограма реєстрації температури у рідкоскляному наповнювачі чавунного бінарного виливка після заливання.

На рис. 3.7 наведено окремий фрагмент термограми який дає змогу визначити максимальні температури в контрольних точках та тривалість перебування наповнювача в температурній області понад  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що відповідає умовам вторинного підвищення міцності та перебудови силікатної зв'язувальної фази [53, 74, 81].

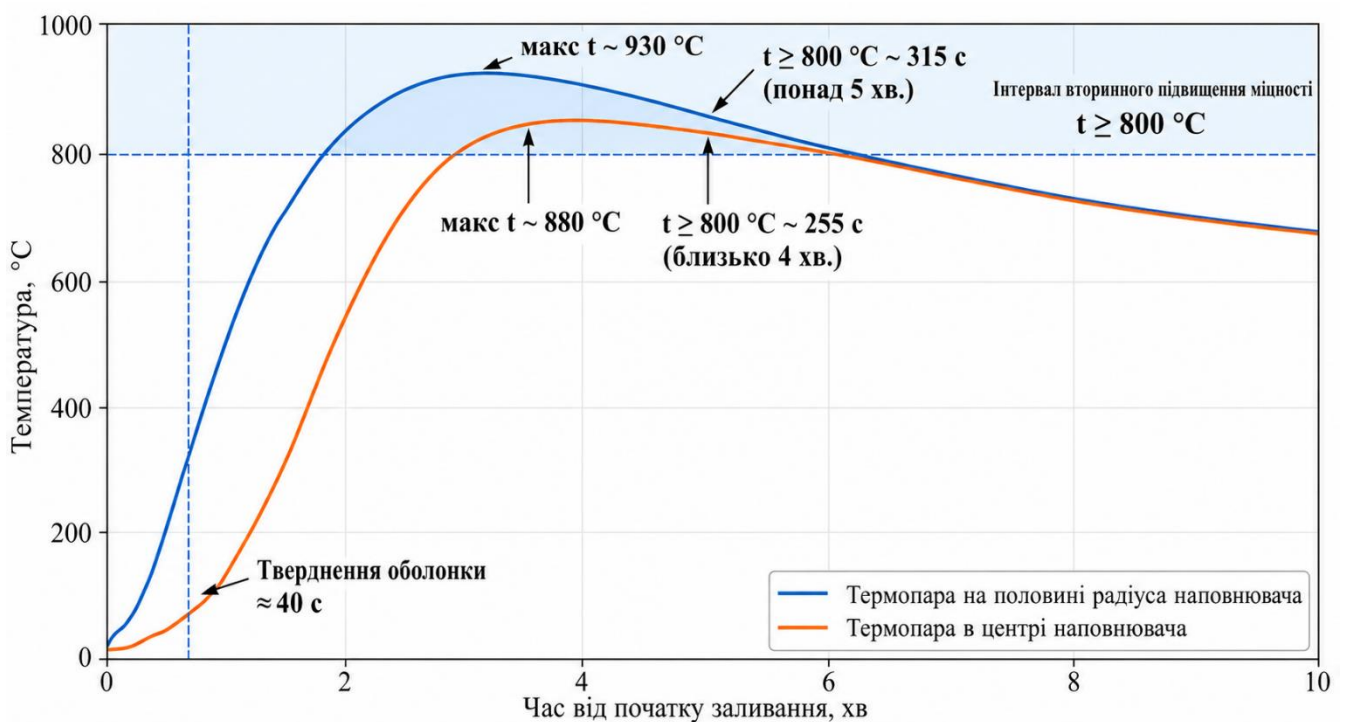


Рисунок 3.7 Фрагмент початкової ділянки термограми: 1 - на  $\frac{1}{2}$  радіуса наповнювача; 2 - у центрі наповнювача.

Реєстрацію температури термопарами починали до моменту заливання металу, для того щоб зафіксувати температуру наповнювача. Для аналізу експерименту в подальшому, початок заливання металу приймали за  $t = 0$ .

Із аналізу експериментальних результатів видно, що після заливання металу температура в наповнювачі зростає нерівномірно.

На початковій стадії, коли через 40 с відбувається тверднення чавунної оболонки фіксується значний температурний перепад при прогріванні наповнювача. Температура на пів радіуса становить близько 350-370 °С, а в центрі близько 100 °С. Подальше зростання температури відбувається вже після завершення тверднення металу за рахунок тепла акумульованого металеву оболонкою.

Далі, максимальна температура наповнювача із РСС у точці на пів радіуса (крива 1) становила близько 930 °С, а тривалість перебування в температурній області вторинного підвищення міцності понад 800 °С була біля 315 с (понад 5 хв.), тоді як у центрі наповнювач (крива 2) максимальна температура його прогрівання становила 880 °С та тривалість перебування за температури понад 800 °С була протягом 255 с (близько 4 хв.),

Запізнення прогрівання центру наповнювача відносно зони на пів радіуса становило орієнтовно 35–45 с.

Такий температурно-часовий режим є достатнім для видалення вологи з рідкоскляного зв'язувального компонента, розм'якшення натрієвих силікатів, яке починається при температурах близько 800 °С і вище, та формування твердого силікатного зв'язку між зернами кварцового піску після охолодження [53, 74].

Порівняння розрахункових кривих 1 і 2 на рис. 3.4.а з експериментальними кривими 1 і 2 на рис. 3.7 показує збіг основного характеру прогрівання наповнювача.

Середнє відхилення розрахункових температур від експериментальних даних не перевищувало 10 %, що знаходиться в межах прийнятної похибки для подібних теплофізичних задач і підтверджує адекватність обраної математичної моделі для дослідження теплових процесів таких бінарних виливків.

В результаті проведеного експерименту встановлено, що температурні процеси які відбуваються у рідкоскляному наповнювачі бінарного виливка

здатні забезпечити температурне зміцнення такого наповнювача, що може створювати умови для підвищеної стійкості наповнювача, здатності чинити опір проникненню чужорідних тіл, протистояти зовнішнім температурним впливам та зберігати несучу здатність, що є необхідною умовою для такого класу виробів.

### **Висновки до розділу 3**

1. Теоретично обґрунтовано особливості перебігу теплофізичних процесів під час формування бінарних виливків системи «металева оболонка - неметалевий наповнювач» в умовах лиття за моделями, що газифікуються. Показано, що інтегрований наповнювач є не лише внутрішнім формоутворювальним елементом, а активною складовою тепломасообміну, яка впливає на швидкість охолодження металевої оболонки, характер її тверднення та температурні умови формування перехідного шару.

2. Сформульовано математичну модель тепломасообмінних процесів у системі «метал - наповнювач - форма», яка базується на узагальненому рівнянні теплопровідності у формі ентальпії та враховує фазові перетворення металевої оболонки, неідеальний тепловий контакт на межі «метал — наповнювач», теплофізичні властивості матеріалів, а також специфіку ЛГМ-процесу, пов'язану з газифікацією пінополістиролової моделі. Це дало змогу розглядати процес формування виливка як взаємопов'язану систему тверднення металу та прогрівання неметалевого наповнювача.

3. Методом математичного та комп'ютерного моделювання встановлено, що тип неметалевого наповнювача суттєво визначає характер тепломасообміну у виливку. Рідкоскляна суміш, порівняно з керамзитом, інтенсивніше відводить теплоту від металевої оболонки в зоні контакту, що зумовлює більший температурний перепад у наповнювачі та спрямований характер тверднення оболонки. Для керамзиту характерний більш рівномірний прогрів за рахунок конвективного перенесення теплоти у

міжгранульному просторі, що зменшує температурні градієнти, але змінює умови формування перехідної зони.

4. Встановлено, що у виливку з рідкоскляним наповнювачем тверднення металевої оболонки завершується орієнтовно за 40 с, однак після цього наповнювач продовжує інтенсивно акумулювати тепло від металу. Такий режим є важливим для формування вторинного підвищення міцності рідкоскляного наповнювача, оскільки забезпечує прогрівання його об'єму до температур, за яких відбуваються видалення залишкової вологи, перебудова силікатної зв'язувальної фази та утворення міцного зв'язку між зернами кварцового піску після охолодження.

5. Експериментальна перевірка температурного стану рідкоскляного наповнювача підтвердила досягнення температур, достатніх для його вторинного зміцнення: у точці на половині радіуса наповнювача максимальна температура становила близько 930 °С, а в центрі близько 880 °С. Тривалість перебування наповнювача в температурній області понад 800 °С становила відповідно близько 315 с та 255 с, що підтверджує можливість термічного зміцнення рідкоскляної суміші по всьому об'єму.

6. Порівняння розрахункових температурних залежностей з експериментальними даними показало збіг основного характеру прогрівання рідкоскляного наповнювача. Середнє відхилення розрахункових температур від експериментальних значень не перевищувало 10 %, що підтверджує адекватність обраної математичної моделі для прогнозування температурних полів і кінетики тверднення бінарних виливків із неметалевим наповнювачем в умовах ЛГМ.

7. Теоретичним аналізом можливих фізико-хімічних процесів у контактній зоні «металева оболонка - рідкоскляний наповнювач» встановлено термодинамічну ймовірність взаємодії оксидів заліза та марганцю з кремнеземною складовою наповнювача з утворенням силікатних фаз  $\text{FeSiO}_3$  і  $\text{MnSiO}_3$ . Від'ємні значення зміни енергії Гіббса для цих реакцій свідчать про

можливість їх перебігу при температурах заливання залізовуглецевих сплавів. Утворення таких силікатних фаз може сприяти зміцненню перехідного шару та підвищенню зв'язку між металевою оболонкою і рідкоскляним неметалевим наповнювачем.

8. Отримані теоретичні результати показують, що температурно-часові умови, які формуються у системі «металева оболонка - рідкоскляний наповнювач», створюють передумови для формування міцної контактної зони та підвищення опору наповнювача зовнішньому механічному впливу. Це обґрунтовує доцільність використання рідкоскляної суміші як функціонального наповнювача у бінарних литих конструкціях і є основою для подальших експериментальних досліджень структури, мікротвердості та роботи пробивання, наведених у наступному розділі

## РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 4.1 Результати визначення роботи пробивання

Експериментальні дослідження проводили для визначення діапазону вмісту зв'язувального компонента при якому наповнювач в металевій оболонці після заливання металу зберігає цілісність та достатній опір пробиванню і в той же час не потребує надмірного збільшення кількості рідкого скла.

Порівняння проводили для чавунних і сталевих зразків із рідкоскляним наповнювачем на основі кварцового піску натрієвого рідкого скла з модулем 2,9. Вміст рідкого скла змінювали в межах 4–16 г на 100 г кварцового піску, що відповідає 3,8–13,8 мас. % рідкого скла у суміші.

Випробування проводили за допомогою звичайного копра, бойок якого імітує індентор, за методикою описаною в підрозділі 2.2.

Враховували, що зменшення об'єм вільних пор між зернами впливає на ущільнення зернистої структури наповнювача, і відповідно підвищенню його опору проникнення. Тому використовували доступний дрібний річковий кварцовий пісок, фактичний гранулометричний склад якого наведено у підрозділі.2.1.

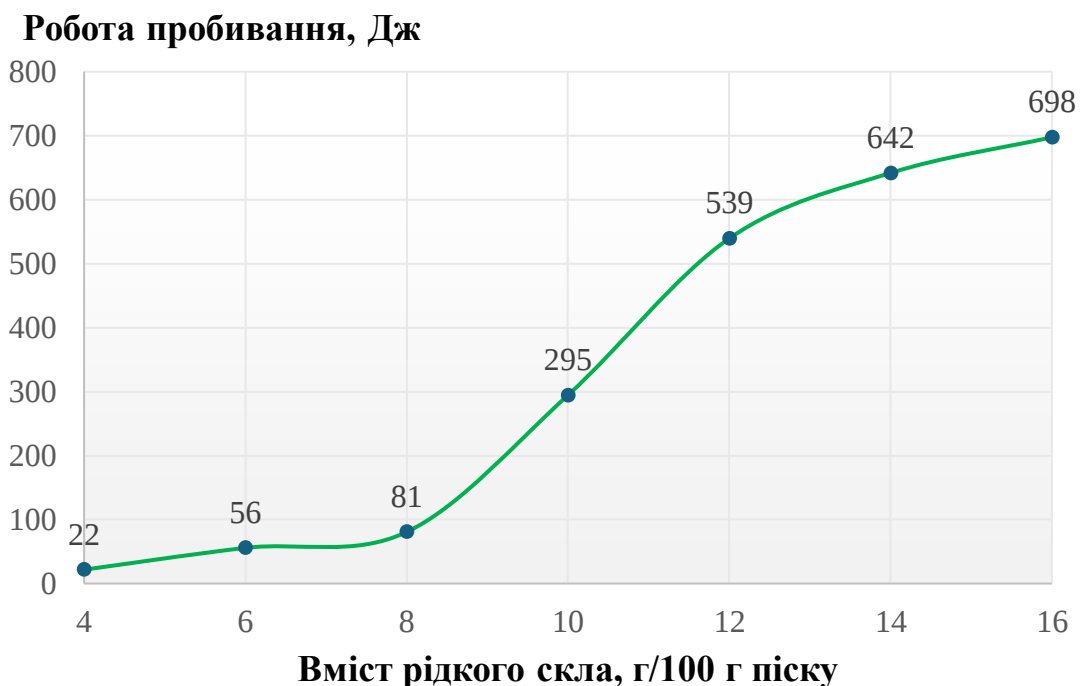
Результати розрахунку середніх значень роботи пробивання чавунних і сталевих зразків, визначених за трьома випробуваннями, залежно від вмісту рідкого скла в наповнювачі наведено на рис. 4.1

Для чавунних зразків при вмісті 4-8 г рідкого скла на 100 г кварцового піску (3,8–7,4 мас. %), робота пробивання є невисокою і не перевищує 81 Дж. Починаючи з вмісту 10 г (9,1 мас. %,) цей показник зростає до 295 Дж, а в діапазоні 12-14 г, тобто 10,7–12,3 мас. %, спостерігається подальше значне підвищення роботи пробивання до 539–642 Дж. Максимальне значення для чавунних зразків отримано при вмісті 16 г рідкого скла на 100 г піску (13,8 мас. %), де робота пробивання становить 698 Дж.

Після повного занурення бойка у чавунних зразках 1-1, 2-1, 3-1, 4-1 з вмістом 4-10 г рідкого скла на 100 г піску (3,8–9,1 мас. %), з нижньої сторони зразка випадала частина наповнювача у вигляді конуса. Для зразків 5-1, 6-1, 7-1 з вмістом 12, 14 та 16 г рідкого скла на 100 г піску (10,7; 12,3 та 13,8 мас. %), видалити наповнювач із металевої оболонки не вдавалося, що свідчить про збереження ним достатньо високої залишкової міцності після теплової дії розплаву.

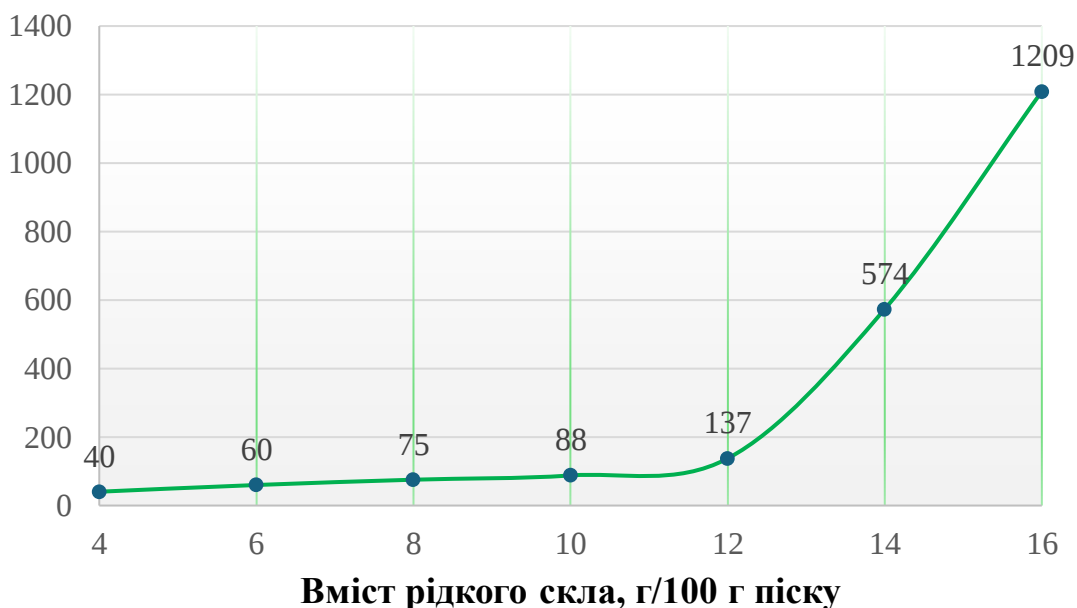
Для сталевих зразків при вмісті 4-10 г рідкого скла на 100 г піску (3,8–9,1 мас. %), робота пробивання також залишається невисокою. При 12 г рідкого скла (10,7 мас. %), вона починає зростати і становить 137 Дж. За вмісту 14 г рідкого скла (12,3 мас. %), робота пробивання збільшується до 574 Дж, а при 16 г (13,8 мас. %), досягає максимального значення 1209 Дж.

Після повного занурення бойка у сталевих зразках 1-2, 2-2, 3-2, 4-2, 5-2 з вмістом 4-12 г рідкого скла на 100 г піску (3,8–10,7 мас. %), з нижньої сторони зразка також випадала частина наповнювача у вигляді конуса. У зразках 6-2 і 7-2 з вмістом 14 та 16 г рідкого скла на 100 г піску (12,3 та 13,8 мас. %), видалити наповнювач із металевої оболонки не вдавалося.



а)

### Робота пробивання, Дж



б)

Рисунок 4.1 Робота пробивання рідкоскляного наповнювача у литих чавунних (а) і сталевих (б) оболонках залежно від вмісту рідкого скла.

Для чавунних та сталевих зразків зі збільшенням вмісту рідкого скла в наповнювачі спостерігається зростання роботи пробивання, однак характер цього зростання відрізняється.

У чавунних зразках суттєве підвищення опору пробиванню проявляється вже при вмісті 10–12 г рідкого скла на 100 г кварцового піску (9,1 та 10,7 мас. %), тоді як у сталевих зразках найбільше зростання спостерігається в діапазоні 14–16 г. (12,3 та 13,8 мас. %).

Різниця в роботі пробивання між чавунними та сталевими зразками при однаковому вмісті рідкого скла пов'язана з температурною залежністю міцності рідкоскляних сумішей і відповідно різними тепловими умовами у наповнювачі [49, 53, 84].

Додатковим чинником, що впливає на відмінність отриманих результатів, є усадка металевої оболонки, що відбувається в процесі

кристалізації та охолодження металу. Внаслідок усадки оболонка зменшується в розмірах, що призводить до стиснення розташованого всередині наповнювача. Оскільки усадка сталі є більшою, ніж усадка чавуну, сталева оболонка створює значно більший радіальний тиск на наповнювач.

За низької міцності наповнювача, що відповідає низькому вмісту рідкого скла, зв'язки між зернами кварцового піску можуть частково руйнуватися під дією усадкових напружень. Тоді як при достатньому вмісті рідкого скла те саме стиснення додатково ущільнює наповнювач та підвищує його міцність. Саме тому у сталевих зразках помітне зростання роботи пробивання проявляється при вищому вмісті рідкого скла, тоді як у чавунних зразках цей ефект спостерігається раніше [75].

#### **4.2 Визначення товщини перехідного шару**

За допомогою оптичного мікроскопа МПБ-2, при збільшенні  $\times 24$ , проведено вимірювання товщини перехідного шару між металевою оболонкою та рідкоскляним наповнювачем.

Для цього вивчали розрізані зразки та фіксували мінімальну та максимальну товщину перехідного шару [75]. Результати наведені на рис.4.2.

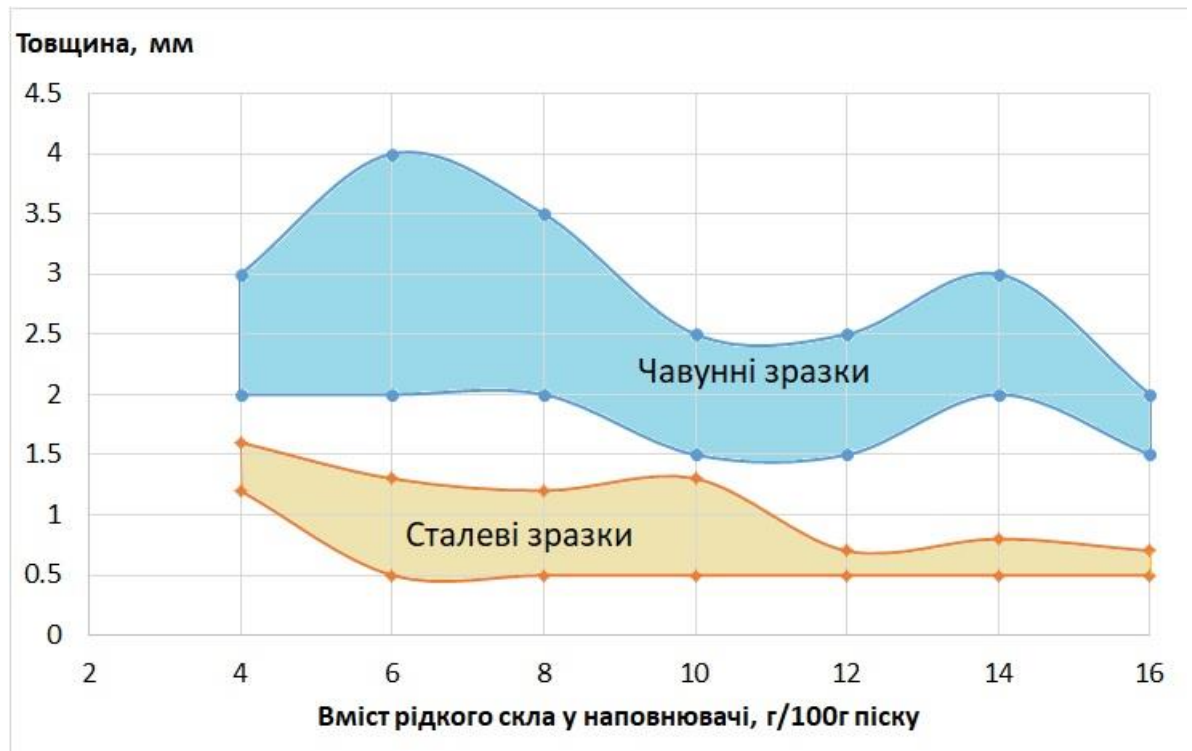


Рисунок 4.2 Товщина перехідного шару для чавунних та сталевих зразків залежно від вмісту рідкого скла у наповнювачі

Формування перехідного шару відбувається внаслідок локальної теплової та фізико-хімічної взаємодії розплаву з приповерхневою зоною рідкоскляного наповнювача.

За літературними даними, у відповідному температурному інтервалі відбувається розм'якшення і розтікання натрієвого силікатного скла, а при нагріванні понад 800 °С відбувається розплавлення силікатів натрію та інтенсифікація спікання рідкоскляної суміші [14, 54]. У системі  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  вже при 753 °С утворюється легкоплавка евтектика, розплав якої спікається з поверхнею зерен кварцового піску і після охолодження формує з ними єдине ціле [14]. У приповерхневій зоні наповнювача ці процеси створюють умови для утворення контактної ділянки та часткового проникнення металевого розплаву в поровий простір, що сприяє формуванню перехідного шару.

Чавун, завдяки кращій рідкоплинності та кращому змочуванню кварцових зерен порівняно зі сталлю, проникає глибше в поровий простір наповнювача, формуючи товстіший перехідний шар. Навіть при нижчій температурі заливання чавуну, товщина перехідного шару в чавунних зразках є в 2–4 рази більшою, ніж у сталевих. Крім того, в роботі [74] зазначено, що зі збільшенням вмісту вуглецю з 2,2 % до 2,8 % робота адгезії силікатного розплаву зростає стрибкоподібно, тому для чавуну адгезія з наповнювачем є максимальною, що додатково сприяє формуванню перехідного шару, а для низьковуглецевої сталі адгезія є значно нижчою, що обмежує товщину шару.

У підрозділі 3.1 на основі теоретичного аналізу було показано можливість утворення силікатних сполук типу  $\text{FeSiO}_3$  та  $\text{MnSiO}_3$  у результаті взаємодії оксидів металу з кремнеземною складовою наповнювача [16, 80]. У межах цього дослідження фазовий склад перехідного шару експериментально не визначали, тому результати вимірювання його товщини не можуть розглядатися як пряме підтвердження утворення зазначених силікатів. Водночас встановлена більша товщина перехідного шару у чавунних зразках порівняно зі сталевими узгоджується з припущенням про інтенсивнішу фізико-хімічну взаємодію чавунного розплаву з рідкоскляним кремнеземним наповнювачем. Утворення силікатних фаз, поряд із проникненням металу в поровий простір і спіканням рідкоскляної складової, може бути одним із чинників зміцнення контактної зони.

Відповідно, товщина перехідного шару характеризує інтенсивність взаємодії металевої оболонки з приповерхневою зоною наповнювача, однак сама по собі не є визначальним критерієм стійкості зразків до пробивання.

В бінарних виливках перехідний шар доцільно розглядати як функціональний елемент, що може частково виконувати роль демпфувального прошарку при динамічному навантаженні.

### **4.3 Мікроструктура перехідного шару та мікротвердість чавунної оболонки**

Металографічні шліфи для дослідження мікроструктури та мікротвердості виготовляли з фрагментів чавунних зразків серії, у якій змінювали вміст рідкого скла у наповнювачі від 4 до 16 % [75].

Дослідження мікроструктури виконували згідно з методикою, наведеною у підрозділі 2.5, а визначення мікротвердості згідно з методикою, наведеною у підрозділі 2.6.

Для визначення впливу вмісту рідкого скла у наповнювачі на формування структури перехідного шару, серед наявних зразків було обрано чавунні зразки з мінімальним № 1-1 та максимальним № 7-1 вмістом рідкого скла у наповнювачі. Зразок № 1-1 з 3,8 мас.% рідкого скла та зразок № 7-1 з 13,8 мас.% рідкого скла.

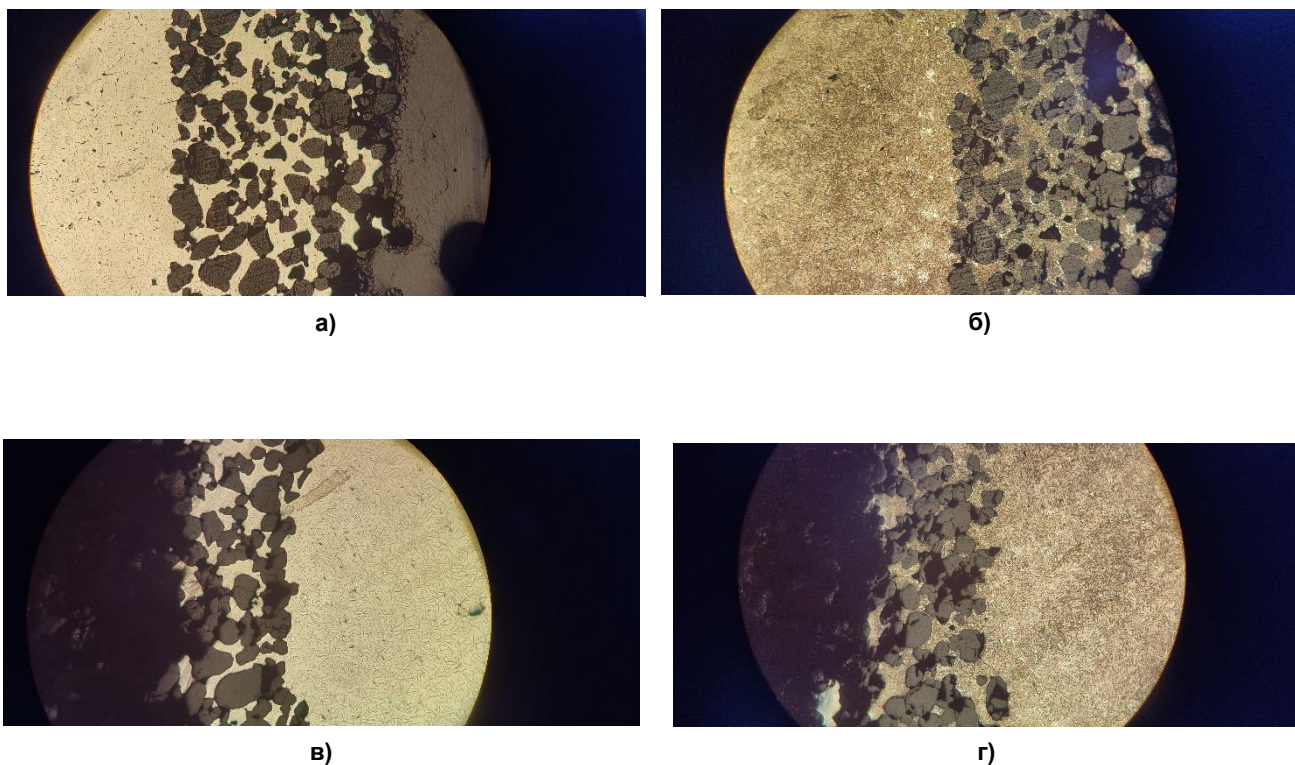
Мікроструктуру досліджували при збільшеннях  $\times 50$  та  $\times 100$ . Для порівняльного аналізу перехідного шару на рис. 4.3 наведено зображення при збільшенні  $\times 50$ .

Це дає змогу порівняти умови формування перехідного шару та виявити особливості мікроструктури металевої оболонки поблизу межі контакту.

У структурі зразка №1-1 в нетравленому стані спостерігається графіт у вигляді окремих пластинчастих колоній, з нерівномірним розподілом та ділянками збіднення графітом біля поверхні, що контактувала з наповнювачем. Після травлення металева оболонка представлена пластинчастим перлітом з невеликою кількістю цементиту, з окремими ділянками зі збільшеним вмістом цементиту до 4 %. Утворення включень цементиту може бути викликане локальним підвищенням швидкості охолодження металу у при поверхневому шарі оболонки.

У зразку №7-1 в нетравленому стані графітні включення мають пластинчасту форму, їх розподіл більш рівномірний, при цьому змін у кількості графіту біля поверхні не спостерігається. Після травлення металева оболонка

представлена пластинчастим перлітом з цементитом у меншій кількості, до 2 %, порівняно зі зразком №1-1, що розташований переважно у вигляді окремих включень при більш однорідній структурі, без виражених зон локального утворення цементиту.



**Рисунок 4.3.** Мікроструктура перехідного шару у чавунних зразках 1-1 (а, б) і 7-1 (в, г) в нетравленому стані (а, в) і травленому стані (б, г) при збільшенні x50

У зразку № 7-1 більш рівномірний розподіл графіту та менша кількість цементиту в зоні контакту можуть розглядатися як сприятливі структурні ознаки щодо зниження крихкості чавунної оболонки.

Для порівняння властивостей чавунної матриці провели визначення мікротвердості на кількох ділянках шліфа зразка 1-1 та 7-1 на відстані 0,5 мм від краю зовнішньої поверхні металевої оболонки, що контактувала з формувальним піском, у середині стінки оболонки та в зоні перехідного шару.

Отримані значення мікротвердості чавуну для всіх зон перебувають у діапазоні 1700–2800 МПа, і наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 Мікротвердість у різних зонах чавунних зразків

| Зона вимірювання                             | Зразок 1-1               | Зразок 7-1 |
|----------------------------------------------|--------------------------|------------|
|                                              | Середні значення,<br>МПа |            |
| 0,5 мм від краю зовнішньої поверхні оболонки | 2390                     | 1784       |
| Середина стінки оболонки                     | 2505                     | 2314       |
| Перехідний шар                               | 2441                     | 2763       |

Отримані значення мікротвердості перебувають у межах, характерних для перлітної металевої основи сірого чавуну. Для зразка 1-1 значення мікротвердості у різних зонах змінюються незначно, що свідчить про відносно однорідний стан металевої основи. Для зразка 7-1 спостерігається підвищення мікротвердості безпосередньо в зоні перехідного шару, що може бути пов'язано з локальним структурним ущільненням контактної ділянки, наявністю дрібнодисперсних фаз або впливом силікатної складової наповнювача.

За результатами металографічного аналізу можна констатувати, що збільшення вмісту рідкого скла у наповнювачі впливає як на стан самого перехідного шару, так і на мікроструктуру чавунної оболонки поблизу межі контакту. Для зразка 7-1 характерні більш рівномірний розподіл графіту, менша кількість цементиту та підвищена мікротвердість у зоні перехідного шару, що говорить про формування більш вираженої контактної зони між чавуном і рідкоскляним наповнювачем.

#### 4.4 Результати випробування зразків на стиск

Згідно з методикою, наведеною у підрозділі 2.7, було проведено випробування дослідних зразків на стиск. Метою випробувань було порівняння несучої здатності чавунних зразків з рідкоскляним наповнювачем, чавунних зразків без наповнювача та рідкоскляного наповнювача без металевої оболонки.

Результати випробувань наведено в табл. 4.2. Для зіставлення отриманих результатів силу руйнування перераховували в умовне напруження руйнування шляхом ділення сили на площу поперечного перерізу відповідного зразка. Для чавунних трубчастих зразків розрахунок виконували за площею поперечного перерізу металевої оболонки, а для рідкоскляного наповнювача без оболонки за площею поперечного перерізу стрижня.

Таблиця 4.2 Результати випробування зразків на стиск

| Тип зразка                                     | Показання манометра, кгс/см <sup>2</sup> | Сила руйнування, кН | Умовне напруження руйнування, МПа |
|------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Чавунний зразок з рідкоскляним наповнювачем    | 46                                       | 39,8                | 27,3                              |
| Чавунний зразок без наповнювача                | 36                                       | 31,2                | 21,4                              |
| Рідкоскляний наповнювач без металевої оболонки | 23                                       | 19,9                | 10,1                              |

Порівняння чавунних зразків показало, що зразок з рідкоскляним наповнювачем руйнувався при умовному напруженні 27,3 МПа, тоді як зразок без наповнювача при 21,4 МПа. Відповідно, використання рідкоскляного

наповнювача як внутрішньої функціональної фази чавунного бінарного виливка забезпечило підвищення руйнівного навантаження приблизно на 28 %. Коефіцієнт підсилення становив 1,28.

Підвищення несучої здатності зразка з наповнювачем можна пояснити тим, що рідкоскляний наповнювач працює в замкненому об'ємі металевій оболонки. У таких умовах металева оболонка створює ефект обойми, обмежує поперечне деформування наповнювача і сприяє передаванню частини стискального навантаження на неметалеву фазу. Внаслідок цього такий виливок витримує більше навантаження, ніж чавунний зразок без наповнювача.

Окреме випробування рідкоскляного наповнювача без металевій оболонки показало значно нижче умовне напруження руйнування 10,1 МПа. Тому, ефект підсилення в бінарному виливку зумовлений не лише власною міцністю наповнювача, а його спільною роботою з металевою оболонкою.

Відповідно, результати випробувань на стиск підтвердили доцільність використання рідкоскляного наповнювача як функціональної неметалевої фази, що підвищує несучу здатність чавунного бінарного виливка за умов стискального навантаження.

#### Висновки до розділу 4

1. Експериментально встановлено, що вміст рідкого скла у рідкоскляному наповнювачі є визначальним технологічним чинником, який впливає на його стійкість до пробивання після теплової дії металевого розплаву. Для чавунних зразків зі збільшенням вмісту рідкого скла від 4 до 16 г на 100 г кварцового піску (3,8-13,8 мас. %). робота пробивання зростає від 22 до 698 Дж, а для сталевих від 40 до 1209 Дж. Найбільш раціональним для чавунних оболонок є вміст рідкого скла 12-14 г на 100 г піску (10,7-12,3 мас. %), оскільки в цьому діапазоні забезпечується висока робота пробивання без надмірного збільшення кількості зв'язувального компонента. Для сталевих оболонок ефективним є вміст 14-16 г на 100 г піску (12,3-13,8 мас. %).

2. Встановлено, що при недостатньому вмісті рідкого скла наповнювач після пробивання частково руйнується і випадає з металеві оболонки у вигляді конуса. Для чавунних зразків такий характер руйнування спостерігається при вмісті 4-10 г рідкого скла на 100 г піску (3,8-9,1 мас. %), а для сталевих - при 4-12 г. (3,8-10,7 мас. %). За вмісту рідкого скла 12-16 г (10,7-13,8 мас. %) у чавунних оболонках і 14-16 г (12,3-13,8 мас. %) у сталевих оболонках видалити наповнювач із металеві оболонки не вдавалося, що свідчить про формування цілісної системи «металева оболонка — рідкоскляний наповнювач» після лиття.

3. Експериментально підтверджено формування перехідного шару між металеві оболонкою та рідкоскляним наповнювачем. У чавунних зразках його товщина є у 2-4 рази більшою, ніж у сталевих, що пояснюється кращою рідкоплинністю чавуну, більш інтенсивним проникненням металу в приповерхневий поровий простір наповнювача та вищою адгезійною взаємодією системи «чавун - силікатна складова наповнювача». Разом з тим встановлено, що товщина перехідного шару сама по собі не є визначальним критерієм стійкості до пробивання, оскільки опір руйнуванню залежить також

від міцності самого рідкоскляного наповнювача, його спікання та обтиснення металевою оболонкою.

4. Металографічні дослідження чавунних зразків показали, що збільшення вмісту рідкого скла у наповнювачі впливає на стан перехідного шару. У зразку з підвищеним вмістом рідкого скла спостерігається більш рівномірний розподіл графіту, менша кількість цементиту та підвищена мікротвердість у зоні перехідного шару. Значення мікротвердості чавуну в різних зонах перебувають у межах 1700-2800 МПа, що відповідає перлітній металевій основі сірого чавуну і не свідчить про утворення критично крихкої контактної ділянки.

5. Випробування на стиск підтвердили функціональну роль рідкоскляного наповнювача у бінарному виливку. Чавунний зразок із рідкоскляним наповнювачем витримав навантаження 39,8 кН, тоді як аналогічний чавунний зразок без наповнювача 31,2 кН. Тому, наявність інтегрованого наповнювача підвищує несучу здатність зразка приблизно на 28 %, а коефіцієнт підсилення становить 1,28. Рідкоскляний наповнювач у замкненому об'ємі металевої оболонки працює як внутрішня опорна складова, яка бере участь у сприйнятті стискального навантаження.

6. Отримані експериментальні результати підтверджують технологічну можливість одержання за ЛГМ-процесом бінарних виливків із залізовуглецевих сплавів з інтегрованим рідкоскляним неметалевим наповнювачем. Раціонально підібраний вміст рідкого скла забезпечує збереження цілісності наповнювача після заливання, формування перехідного шару на межі «метал - наповнювач» та підвищення опору зразків локальному пробиванню і стискальному навантаженню.

## **РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ПЕРЕВІРКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ ІНТЕГРОВАНИМ НЕМЕТАЛЕВИМ НАПОВНЮВАЧЕМ**

### **5.1 Передумови розроблення технології виготовлення бінарних виливків**

Під час розроблення технології виготовлення виливків із інтегрованим неметалевим наповнювачем спиралися на відомі закономірності лиття за моделями, що газифікуються [60], результати попередньо проведених теоретичних та експериментальних досліджень на зразках із неметалевими наповнювачами.

Відмінність бінарних виливків від суцільнолитих полягає в заміщенні частини металевого об'єму неметалевим наповнювачем, який інтегрується в структуру виливка. У системі «залізовуглецевий сплав - неметалевий наповнювач» кожен елемент має своє функційне призначення:

- металева оболонка виконує функцію зовнішнього силового каркаса, здатного сприймати ударні та механічні навантаження;
- наповнювач є внутрішньою функціональною фазою, яка знижує загальну масу виливка, поглинає частину енергії удару й перешкоджає наскрізному пробиттю після руйнування металевої оболонки;
- перехідний шар забезпечує механічне зчеплення оболонки з наповнювачем, передачу напружень між компонентами та їхню спільну роботу під навантаженням [16].

Виходячи з цих передумов, головні зусилля під час розроблення технології було зосереджено на визначенні раціонального складу наповнювача, способу його введення в модель, режимів заливання металу та на дослідженні умов формування перехідного шару.

## 5.2 Технологічна схема виготовлення виливків з інтегрованими неметалевими наповнювачами

Загальну послідовність операцій виготовлення виливка сегмента модуля з інтегрованим неметалевим наповнювачем наведено на рис. 5.1.



Рисунок 5.1 Схема технологічного процесу виготовлення виливка сегмента модуля з інтегрованим неметалевим наповнювачем

Технологічна схема включає такі етапи: виготовлення пінополістиролової моделі з внутрішньою порожниною; підготовка та ущільнення неметалевого наповнювача; складання модельного блока; нанесення покриття; формування в сухому кварцовому піску; вакуумування;

заливання металу; охолодження, вибивання та контроль якості готового бінарного виливка.

Спочатку виготовляють пінополістиролову модель, яка, на відміну від звичайної, має внутрішню порожнину для розміщення неметалевого наповнювача. Від точності та якості її виготовлення залежать товщина металевої оболонки, положення наповнювача та рівномірність стінок виливка. Якщо у звичайному ЛГМ-процесі якість моделі впливає в основному на процес газифікації, то для бінарного виливка додатковою вимогою є надійне утримування наповнювача до моменту заливання [ 66, 69, 85].

Неметалевий наповнювач готують на основі кварцового піску та натрієвого рідкого скла. Його властивості залежать від зернового складу піску, силікатного модуля рідкого скла, кількості рідкого скла, рівномірності перемішування, вологості та здатності до ущільнення. Відомо, що саме вміст рідкого скла визначає залишкову міцність суміші після нагрівання, яку в традиційному литті вважають недоліком через ускладнене вибивання [13-15]. У бінарних виливках цю особливість використовують як перевагу, оскільки наповнювач не видаляють із виливка, а він залишається всередині металевої оболонки [75, 86].

Після приготування рідкоскляну суміш рівномірно укладають у внутрішню порожнину моделі, уникаючи розшарувань, пустот і нерівномірного ущільнення, які можуть призвести до локального руйнування наповнювача під час заливання та неоднорідного формування перехідного шару.

Після підготовки моделі з наповнювачем складають модельний блок, приєднуючи до неї елементи ливникової системи. Розташування живильників і колекторів обирають так, щоб забезпечити рівномірне надходження розплаву й ефективне відведення продуктів термодеструкції пінополістиролу [66, 69, 87].

Противпригарне покриття наносять лише на зовнішню поверхню моделі та елементи ливникової системи. Воно забезпечує чисту поверхню виливка, сприяє відведенню газоподібних продуктів термодеструкції пінополістиролу та запобігає проникненню металу у формувальний пісок [14, 66, 85]. Внутрішню поверхню моделі, що контактує з наповнювачем, противпригарним покриттям не покривають, що забезпечує безпосередню взаємодію розплаву з рідкоскляною сумішшю.

Модельний блок встановлюють у контейнерну опоку, пошарово засипають сухим кварцовим піском, віброущільнюють, а потім вакуумують.

Заливання виконують металом, вибір якого визначається функціональним призначенням виливка. Для захисних конструкцій, що працюють в умовах динамічних навантажень, доцільно застосовувати сталь 35Л або високоміцний чавун ВЧ 350-22, які мають достатню ударну в'язкість і здатні поглинати енергію удару без крихкого руйнування. Для несучих елементів типу станин, де переважають статичні навантаження, а на перший план виходять жорсткість і віброгасіння, доцільним є сірий чавун СЧ200, який, крім того, дешевший у виробництві.

Під час заливання металевий розплав газифікує пінополістиролову модель і, досягаючи поверхні наповнювача, охоплює його, частково проникає (інфільтрує) у пори й формує металеву оболонку. У процесі тверднення оболонка фіксує наповнювач у внутрішньому об'ємі, утворюючи з ним бінарну конструкцію.

Після заливання виливок охолоджують у формі до повного тверднення металу. Під час охолодження металева оболонка, скорочуючись унаслідок усадки, стискає внутрішній рідкоскляний наповнювач. За достатнього вмісту рідкого скла (12–14 г на 100 г піску (10,7-12,3 мас.%) для чавуну, 14–16 г (12,3-13,8 мас.%) для сталі) це сприяє ущільненню наповнювача та підвищує його опір локальному руйнуванню [75]. За недостатньої кількості зв'язувального компонента наповнювач, навпаки, викришується і втрачає цілісність.

Після охолодження виливок вибивають із форми, відокремлюють ливникову систему та очищають поверхню. Задовільним вважають виливок, у якого металева оболонка сформувалася без тріщин, сколів і критичних недоливів, рідкоскляний наповнювач зберігся у внутрішньому об'ємі, а на межі металу з наповнювачем утворилася зона механічного зчеплення.

Для отримання бінарного виливка з функціональним наповнювачем і зниженою металоємністю необхідно: використовувати рідкоскляну суміш оптимального складу, суцільно заповнювати нею внутрішню порожнину моделі, залишати зону контакту «метал – наповнювач» без протипригарного покриття й заливати метал за експериментально встановленої (рекомендованої) температури.

### **5.3 Перевірка технології виготовлення сегмента бінарного модуля**

Проведено дослідно-промислову перевірку повного технологічного циклу виготовлення литих модулів за моделями, що газифікуються. Роботи виконували відповідно до розробленої технологічної інструкції (Додаток А). Процес охоплював: виготовлення пінополістиролових (ППС) моделей, нанесення на них протипригарних покриттів, складання модельних блоків, заливання металу за оптимізованими термочасовими параметрами у вакуумовані форми, а також подальше охолодження та твердіння виливків.

Метою перевірки було виготовлення дослідного сегмента бінарного модуля та оцінювання здатності прийнятої технологічної схеми формувати всі функціональні зони бінарного виливка: металеву оболонку заданої товщини, внутрішній неметалевий наповнювач, що зберігає цілісність, і перехідний шар, який забезпечує механічне зчеплення та спільну роботу металу з наповнювачем під навантаженням.

Перевірку здійснювали на дослідному сегменті захисного модуля розміром 200×200×50 мм, геометрія якого відтворює один з елементів модульної конструкції типу «Модуль 405×410 мм».

Оцінці підлягали: розроблені методики розрахунку базових параметрів, послідовність технологічних етапів, види та характеристики використаних матеріалів, а також межі варіювання параметрів одержання ППС-моделей (автоклавним способом і методом теплового удару) та приготування протипригарних покриттів.

У ході роботи виготовляли чавунні сегменти з рідкоскляним та керамзитовим наповнювачами, а також сталеві сегменти з рідкоскляним наповнювачем.

На попередньому етапі підтверджено відповідність прес-форм, наявних у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України, для виготовлення моделей сегмента (рис. 5.2).



а



б

Рисунок 5.2 Пінополістиролова модель сегмента литого модуля розміром 200x200x50 мм: а – без наповнювача, б – з рідкоскляним наповнювачем

Наступним кроком виготовляли дослідні виливки згідно з технологічною схемою (підрозділ 5.2).

На рис. 5.3 показані ППС-моделі сегмента з ливниково-живильною системою та нанесеним протипригарним покриттям, а на рис. 5.4 — отримані сталеві та чавунні виливки з неметалевим наповнювачем.



Рисунок 5.3 Пінополістиролові сегменти модуля з ливниково-живильною системою та нанесеним протипригарним покриттям



Рисунок 5.4 Отримані чавунні та сталеві виливки неметалевим рідкоскляним наповнювачем

У виготовлених зразках досліджено формування перехідної зони. На макрошліфі чавунного виливка з рідкоскляною сумішшю (РСС) візуалізується просочування металу в наповнювач та наявність перехідної зони (рис. 5.5, а). Металографічний аналіз (рис. 5.5, б, в) показав ферито-перлітну структуру з рівномірним розподілом графіту. Поверхня контакту «метал – наповнювач» щільна, газові пори відсутні.

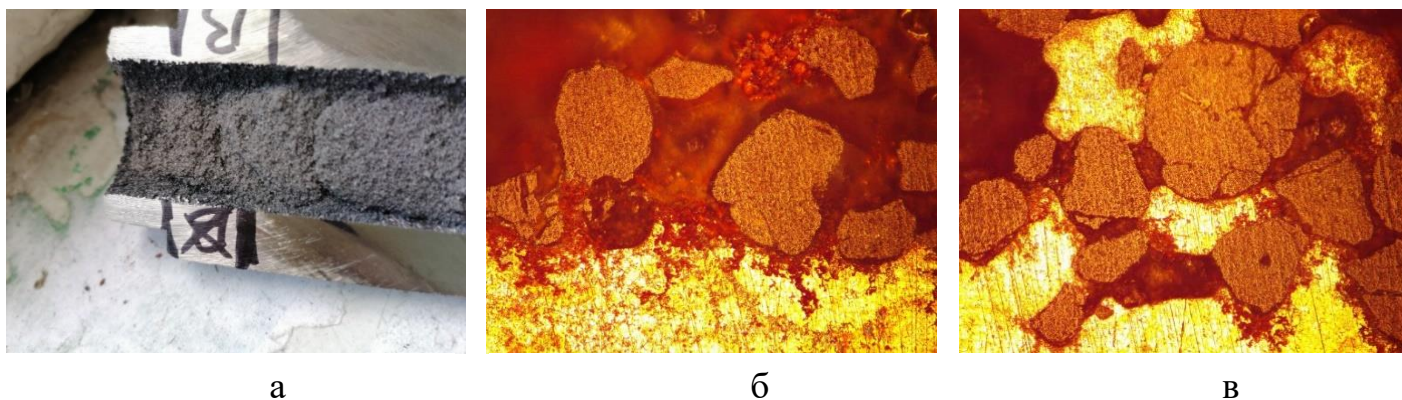


Рисунок 5.5 Макро- (а) і мікроструктура (б, в) чавунного виливка з РСС. Температура заливання 1430° С

На відміну від цього, при використанні керамзитового наповнювача (рис. 5.6) за температури 1350 °С відбулося часткове оплавлення гранул керамзиту та перетворення їх на шлак, змішаний з металом.

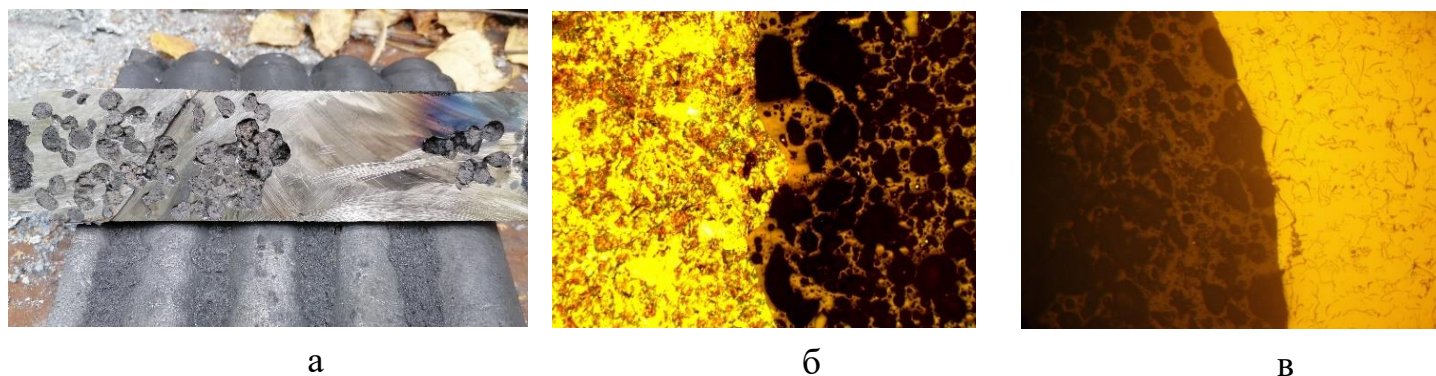


Рисунок 5.6 Макро- (а) і мікроструктура (б, в) чавунного виливка з керамзитовим наповнювачем. Температура заливання 1350° С

Дослідження перехідного шару на сталевому зразку з РСС (рис. 5.7) показало, що вища температура заливання сприяє формуванню розвиненого перехідного шару по всій поверхні контакту.

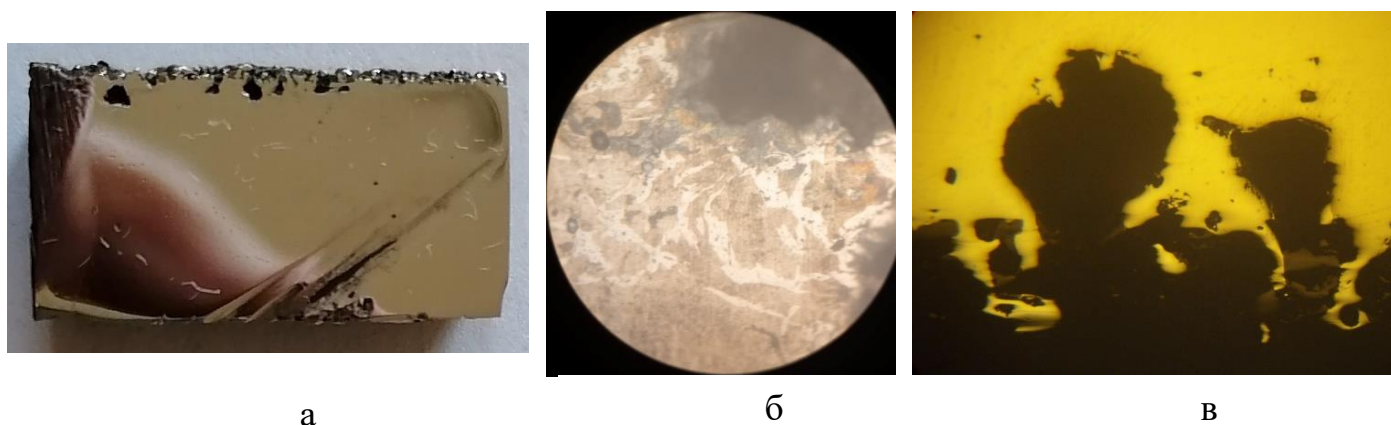


Рисунок 5.7 Макро- (а) і мікроструктура (б, в) сталевого виливка з РСС

Результати перевірки підтвердили можливість отримання методом ЛГМ сегмента бінарного модуля з рідкоскляним наповнювачем. Одержаний виливок має суцільну металеву оболонку, збережений внутрішній наповнювач і якісний перехідний шар. Встановлені теоретичні положення реалізовано в технологічній схемі одержання виливків із функціонально заповненим внутрішнім об'ємом. Водночас використання керамзиту потребує додаткової оптимізації термічних режимів для запобігання його шлакуванню.

#### **5.4 Оцінка техніко-екологічного ефекту виготовлення виливків із інтегрованим неметалевим наповнювачем**

Техніко-екологічний ефект бінарного виливка досягається за рахунок заміщення частини внутрішнього об'єму рідкоскляним наповнювачем. Це комплексно знижує: металоємність, масу пінополістиролової (ППС) моделі,

витрати шихти, енергії на плавлення та, як наслідок, обсяг продуктів термодеструкції. Оскільки заповнений наповнювачем об'єм у моделі відсутній, поліпшується газовий режим форми, знижується ймовірність газових дефектів та підвищується стабільність заповнення [9, 60, 88, 89].

Зменшення маси ППС-моделі оцінюють за виразом 5.1:

$$\Delta m_{\text{ППС}} = m_{\text{ППС0}} \cdot K_V, \quad (5.1)$$

де  $\Delta m_{\text{ППС}}$  — зменшення маси моделі, кг;  $m_{\text{ППС0}}$  — маса моделі для суцільнолитого аналога, кг;  $K_V$  — частка внутрішнього об'єму, заміщеного наповнювачем. Для дослідних циліндричних зразків (внутрішній діаметр 50 мм, товщина стінки 8 мм)  $K_V \approx 0,574$ , тобто близько 57 % об'єму моделі, який у суцільнолитому варіанті припадав би на метал, заміщено наповнювачем.

Відносне зменшення загальної маси бінарного виробу обчислюють за формулою 5.2:

$$K_m = \frac{m_0 - m_6}{m_0} \cdot 100\%, \quad (5.2)$$

де  $m_0$  — маса суцільнолитого аналога, кг;  $m_6$  — маса бінарного виливка з наповнювачем, кг.

Важливо розрізняти зменшення витрати металу та зменшення загальної маси готового виробу. Витрата металу знижується прямо пропорційно частці об'єму, заміщеного наповнювачем. Загальна ж маса зменшується менше, оскільки місце вилученого металу займає рідкоскляний наповнювач, який теж має власну масу.

Для дослідних циліндричних зразків заміщення центрального об'єму рідкоскляним наповнювачем зменшило частку металевого об'єму приблизно на 57,4 %. З урахуванням густини оболонки і наповнювача загальна маса знизилася на 35,9 % для чавунного варіанта та на 37,7 % для сталевого. Ці

значення не можна переносити на інші виливки без урахування їхньої геометрії, але вони демонструють реальний масштаб зниження металоємності.

Оскільки виливок «Модуль 405×410 мм» (рис. 5.8) конструктивно складається з чотирьох сегментів розміром близько 200×200×50 мм кожен, розрахункову оцінку зменшення металоємності проводили для одного такого сегмента, а потім поширювали на весь модуль.

За кресленням маса одного порожнистого сталевих сегмента, призначеного для заповнення неметалевим наповнювачем, становить 7,04 кг. Маса металеві оболонки модуля з чотирьох таких сегментів:

$$m_{об.м} = 4 \cdot 7,04 = 28,16 \text{ кг.}$$

Для орієнтовної оцінки техніко-екологічного ефекту використано співвідношення, отримані на сталевих дослідних зразках. У цих зразках частка металевих об'єму, заміщеного наповнювачем, становила близько 57,4 %, тобто маса металеві оболонки відповідала приблизно 42,6 % маси суцільнолитого аналога.

Тоді орієнтовна маса одного суцільнолитого сталевих сегмента:

$$m_{с.с} = 7,04 / (1 - 0,574) \approx 16,5 \text{ кг.}$$

Маса суцільнолитого модуля з чотирьох сегментів:

$$m_{с.м} = 4 \cdot 16,5 \approx 66,1 \text{ кг.}$$

Економія сталі на одному сегменті становить:

$$\Delta m_{мет.с} = 16,5 - 7,04 \approx 9,5 \text{ кг.}$$

Для модуля з чотирьох сегментів економія сталі становить:

$$\Delta m_{мет.м} = 66,1 - 28,16 \approx 37,9 \text{ кг.}$$

Оскільки внутрішній об'єм порожнистих сегментів заповнюється рідкоскляним неметалевим наповнювачем, загальна маса бінарного модуля більша за масу самої металеві оболонки.

Для розрахунку загальної маси бінарного модуля спочатку визначимо масу наповнювача. Виходячи з об'єму заміщеної порожнини (57,4 % від об'єму суцільного сегмента) та середньої густини рідкоскляного наповнювача,

орієнтовна маса наповнювача в одному сегменті становить близько 3,3 кг. Тоді загальна маса бінарного модуля з чотирьох сегментів:

$$m_{\text{б.м}} = m_{\text{об.м}} + m_{\text{н.м}} = 28,16 + 13,0 \approx 41,2 \text{ кг.}''$$

Перехід від суцільнолитого сталевго модуля до бінарного модуля з металевою оболонкою та рідкоскляним наповнювачем дає змогу орієнтовно зменшити витрату сталі з 66,1 до 28,16 кг, тобто приблизно на 37,9 кг, або на 57,4 %. При цьому загальна маса бінарного модуля з урахуванням наповнювача становить близько 41,2 кг, що приблизно на 37,7 % менше порівняно із суцільнолитим сталевим аналогом.



Рисунок 5.8 Загальний вигляд виливка «Модуль 405×410 мм»

Таблиця 5.1 Порівняльна оцінка металоємності та маси для виливка  
«Модуль 405×410 мм»

| Показник                    | Один<br>сегмент | Модуль<br>(4 сегменти) |
|-----------------------------|-----------------|------------------------|
| <b>Суцільнолитий аналог</b> |                 |                        |

| Показник                           | Один<br>сегмент | Модуль<br>(4 сегменти) |
|------------------------------------|-----------------|------------------------|
| Розрахункова маса, кг              | 16,5            | 66,1                   |
| <b>Бінарний виливок</b>            |                 |                        |
| Маса металевої оболонки, кг        | 7,04            | 28,16                  |
| Маса рідкоскляного наповнювача, кг | 3,3             | 13,0                   |
| Загальна маса, кг                  | 10,3            | 41,2                   |
| <b>Досягнутий ефект</b>            |                 |                        |
| Економія металу, кг (%)            | 9,5 (57,4%)     | 37,9 (57,4%)           |
| Зменшення загальної маси, кг (%)   | 6,2 (37,7%)     | 24,9 (37,7%)           |

Наведені значення є попередніми, але свідчать, що інтегрування неметалевого наповнювача дає змогу істотно зменшити витрату сталі й загальну масу виробу порівняно із суцільнолитим варіантом.

Водночас слід враховувати, що введення наповнювача потребує додаткових витрат — кварцового піску, рідкого скла, енергії та часу на приготування, ущільнення, сушіння суміші й контроль її стану. Тому техніко-екологічний ефект оцінюють не лише за масою зекономленого металу, а як баланс між зниженням металоємності та додатковими витратами на підготовку неметалевої складової.

Потенційне зменшення викидів для бінарних виливків порівняно з монолитими оцінюють за двома складниками: перший — менша маса пінополістиролу, що газифікується під час заливання; другий — менша маса металу, який потрібно виплавити. Сумарне зниження екологічного навантаження визначається поєднанням цих двох чинників.

Для вилівка «Модуль 405×410 мм» інтегрування неметалевого рідкоскляного наповнювача дозволяє прогнозовано зменшити витрату сталі на 57,4 % (з 66,1 до 28,2 кг) та загальну масу виробу на 37,7 % (з 66,1 до 41,2 кг).

Попередня оцінка техніко-екологічного ефекту не обмежується лише економією металу. Вона також враховує пряме скорочення маси ППС-моделі, що газифікується, та опосередковане зниження викидів від скорочення обсягів плавки. Для повної валідації кількісних показників екологічного навантаження необхідне уточнення даних методами газоаналітичного контролю. Окремо слід враховувати додаткові витрати на виготовлення самого наповнювача, що визначає кінцевий техніко-економічний баланс технології.

#### **Розрахункова оцінка зменшення викидів шкідливих речовин при виготовленні бінарних виливків із неметалевим наповнювачем методом ЛГМ**

Для оцінки екологічного впливу розглянуто сучасні напрямки вирішення проблеми викидів шкідливих речовин у ливарному виробництві [90]:

- знезараження, утилізація та переробка викидів, що потребує значних інвестицій [91];
- попередження порушення екологічної рівноваги шляхом упровадження нових технологій та оптимізації конструкції литих виробів.

Одним із дієвих підходів є зменшення маси вилівка за рахунок видалення надлишкового металу з ненавантажених зон або використання неметалевих наповнювачів. Це безпосередньо знижує потребу в сировині та енергії, не погіршуючи міцнісних характеристик [92]. Легковага конструкція є ефективним способом зменшення викидів CO<sub>2</sub>, пилу та важких металів, що узгоджується з цілями стратегії декарбонізації (European Green Deal) [93].

Розрахунок викидів виконано за удосконаленою методикою [94], що враховує результати досліджень ФТІМС НАН України з утворення та

нейтралізації продуктів термодеструкції пінополістиролу при заливанні металу [94, 95].

Порядок визначення викидів включає такі етапи:

- визначення джерел виділення викидів за технологічними ділянками;
- визначення питомих показників виділення забруднюючих речовин;
- урахування ефективності очисного обладнання;
- розрахунок валових і максимальних разових викидів;
- розрахунок загальних валових викидів за рік за видами речовин;
- визначення обсягів викидів в атмосферу з урахуванням очищення.

Для оцінювання техніко-екологічного ефекту виготовлення бінарних виливків із неметалевим наповнювачем доцільно враховувати не лише зменшення витрати металу, а й характер утворення викидів на основних виробничих ділянках ЛГМ-процесу. Узагальнений порядок визначення викидів і відходів шкідливих речовин наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 Основні джерела та порядок визначення викидів і відходів шкідливих речовин при ЛГМ-процесі

| Порядок визначення               | Ділянки та процеси                                                                                           | Тип викидів або операцій                              | Результат обліку                                                |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| На 1 т виливків за видами сплаву | Виготовлення пінополістиролових моделей; заливально-формування ділянка; плавлення; ділянка фінішних операцій | Викиди від обладнання та технологічного процесу       | Валові питомі викиди шкідливих речовин за ділянками і процесами |
| Максимальні разові викиди        | Основні технологічні операції ЛГМ-процесу                                                                    | Короточасні викиди під час виконання окремих операцій | Максимальні разові викиди забруднюючих речовин                  |
| Сумарні викиди                   | Сукупність виробничих ділянок, пов'язаних                                                                    | Викиди шкідливих речовин за всіма                     | Загальна кількість викидів на 1 т                               |

|                                                                              | із виготовленням<br>випусків                                                         | ділянками і<br>процесами                                            | придатних<br>випусків                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| На річний<br>випуск лиття                                                    | Виробництво<br>випусків за<br>прийнятою річною<br>програмою                          | Викиди,<br>перераховані на<br>річний обсяг<br>виробництва           | Загальні валові<br>викиди за рік за<br>видами<br>забруднюючих<br>речовин                  |
| Екологічний<br>моніторинг та<br>обладнання для<br>очищення і<br>знешкодження | Ділянки утворення<br>пилу, газоподібних<br>продуктів та<br>технологічних<br>відходів | Очищення,<br>уловлювання та<br>знешкодження<br>шкідливих<br>речовин | Контроль,<br>зменшення та<br>локалізація<br>шкідливого<br>впливу<br>виробництва           |
| Прогнозовані<br>можливі викиди                                               | Виготовлення<br>бінарних випусків<br>із неметалевим<br>наповнювачем                  | Відходи та<br>викиди в<br>атмосферу                                 | Оцінка<br>можливого<br>зменшення<br>викидів<br>порівняно із<br>суцільнолитим<br>варіантом |

Подальший розрахунок виконують за питомими показниками виділення забруднюючих речовин з урахуванням річного обсягу виробництва та ефективності очисного обладнання. Валові викиди  $M$  (кг/рік) при плавленні металів визначаються за формулою (5.3) [96]:

Валові викиди  $M$  (кг/рік) при плавленні металів визначаються за формулою (5.3) [96]:

$$M = qV\beta(1 - \frac{\eta A}{100}) \quad (5.3)$$

де  $q$  — питома виділення речовини, кг/т;  $V$  — річний обсяг виплавленого металу, т;  $\eta$  — ефективність очищення, %;  $A$  — коефіцієнт справності очисного обладнання. (За відсутності очисних апаратів  $\eta = 0$ ).

Аналогічно визначаються максимальні разові викиди  $G$  (г/с) за формулами (5.4)–(5.7) [97].

Максимальні разові викиди забруднюючих речовин (г/с) при плавленні металу визначаються за формулою 5.4:

$$Gi = \frac{q''_i}{3,6} B \beta \cdot \left(1 - \frac{\eta \cdot A}{100}\right) \quad (5.4)$$

де  $q''_i$  – питома виділення речовин в одиницю часу, кг/год (у формулі 2  $\frac{q''_i}{3,6}$  відповідає розмірності г/с).

Валове виділення забруднюючих речовин у процесі випуску металу з печі (кг/рік) визначається за формулою 5.5:

$$M^{BЧ}_i = q_i \cdot B \cdot 10^{-3}, \quad (5.5)$$

де  $B$  – кількість виплавленого чавуну, т;

$q_i$  – питома виділення речовин на одиницю продукції, г/т.

Максимально разові викиди забруднюючих речовин (г/с) при випуску чавуну визначаються за формулою 5.6:

$$Gi = \frac{q_i}{3600} \cdot B \quad (5.6)$$

де  $B$  – кількість виплавленого чавуну в годину, т;

3600 – перевідний коефіцієнт одиниць виміру.

Максимально разові викиди пилу (г/с) визначаються за формулою 5.7:

$$G = \frac{q''_n}{3,6} \cdot \left(1 - \frac{\eta \cdot A}{100}\right) \quad (5.7)$$

де  $q''_n$  – кількість пилу, що виділяється, на одиницю часу роботи устаткування, кг/год;

3,6 – перевідний коефіцієнт одиниць виміру.

За цими залежностями розраховано викиди для річного випуску 1000 т литва із сірого чавуну при плавленні в індукційних печах ICT-1,0 (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 Валові (M) та максимальні разові викиди (G) шкідливих речовин на 1000 т сірого чавуну

| Ділянка або операція          | Вид викидів | Забруднюючі речовини |       |                     |                 |                     |                      |                     |                     |                     |                      |
|-------------------------------|-------------|----------------------|-------|---------------------|-----------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
|                               |             | пил                  | CO    | NO <sub>2</sub>     | SO <sub>2</sub> | Фториди             | Заліза оксид         | Толуол              | Пентан              | Бензол              | Стирола оксид        |
| Плавлення чавуну              | M, т/рік    | 1,04                 | 0,58  | 0,036               | 0,002           | $2,4 \cdot 10^{-4}$ | 1,16                 | -                   | -                   | -                   | -                    |
|                               | G, г/с      | 0,092                | 0,162 | 0,01                | 0,002           | $0,7 \cdot 10^{-4}$ | 0,04                 | -                   | -                   | -                   | -                    |
| Розливання чавуну             | M, т/рік    | -                    | 0,6   | 0,006               | -               | $2,4 \cdot 10^{-4}$ | 0,26                 | -                   | -                   | -                   | -                    |
|                               | G, г/с      | -                    | 0,23  | $0,2 \cdot 10^{-3}$ | -               | $0,6 \cdot 10^{-5}$ | 0,0003               | -                   | -                   | -                   | -                    |
| Підготовка матеріалів         | M, т/рік    | 19,2                 | -     | -                   | -               | -                   | -                    | -                   | -                   | -                   | -                    |
|                               | G, г/с      | 1,8                  | -     | -                   | -               | -                   | -                    | -                   | -                   | -                   | -                    |
| Виготовлення моделей          | M, т/рік    | -                    | -     | -                   | -               | -                   | -                    | 0,196               | 0,16                | 0,06                | -                    |
|                               | G, г/с      | -                    | -     | -                   | -               | -                   | -                    | $0,7 \cdot 10^{-4}$ | $0,7 \cdot 10^{-4}$ | $0,7 \cdot 10^{-4}$ | -                    |
| Формування заливальна ділянка | M, т/рік    | 6,3                  | 2,08  | 0,004               | 1,08            | 0,4                 | 0,76                 | 0,06                | 0,24                | 0,16                | 0,76                 |
|                               | G, г/с      | 2,6                  | 0,04  | 0,001               | 0,002           | $4,0 \cdot 10^{-4}$ | $5,41 \cdot 10^{-4}$ | $4,0 \cdot 10^{-5}$ | $1,7 \cdot 10^{-4}$ | $0,1 \cdot 10^{-4}$ | $5,41 \cdot 10^{-4}$ |
| Ділянка обробки і очистки     | M, т/рік    | 16,4                 | 0,4   | -                   | -               | -                   | -                    | -                   | -                   | -                   | -                    |
|                               | G, г/с      | 0,05                 | 0,004 | -                   | -               | -                   | -                    | -                   | -                   | -                   | -                    |
| Ділянка термообробки          | M, т/рік    | -                    | 2,4   | -                   | -               | -                   | -                    | -                   | -                   | -                   | -                    |
|                               | G, г/с      | -                    | 0,06  | -                   | -               | -                   | -                    | -                   | -                   | -                   | -                    |
| Всього за                     | M, т/       | 42,9                 | 6,06  | 0,04                | 1,08            | 0,4                 | 2,18                 | 0,256               | 0,4                 | 0,22                | 0,76                 |

|     |     |   |  |   |   |  |  |  |  |  |  |
|-----|-----|---|--|---|---|--|--|--|--|--|--|
| рік | рік | 4 |  | 6 | 2 |  |  |  |  |  |  |
|-----|-----|---|--|---|---|--|--|--|--|--|--|

Кількісну оцінку екологічного ефекту від переходу до бінарної конструкції вилівка виконано на основі порівняння валових викидів для річного випуску 1000 т литва (табл. 5.2). Зниження викидів розглядається за двома незалежними складовими:

1. Зменшення маси моделі ( $K_V \approx 0,574$ ): скорочення обсягу пінополістиролу, що газифікується, прямо пропорційно знижує викиди продуктів його термодеструкції (толуол, бензол, стирол тощо) на формувально-заливальній ділянці та ділянці виготовлення моделей.

2. Зменшення витрати металу ( $K_V \approx 0,574$ ): потреба в металі на одиницю готової продукції скорочується, що веде до пропорційного зниження викидів на всіх металургійних переділах (плавлення, розливання, обрубка, термообробка).

У таблиці 5.4 наведено очікуване зниження валових викидів для основних забруднюючих речовин з урахуванням їх походження.

Таблиця 5.4 Прогнозоване зниження валових викидів (т/рік) при переході на бінарну технологію (умовний розрахунок на 1000 т чавунного литва)

| Забруднююча речовина              | Валовий викид, суцільнолит. варіант, т/рік | Основний фактор зниження        | Частка зниження, % ( $K_V$ ) | Очік. зменш. викиду, т/рік | Прогноз. викид, бін. вил., т/рік |
|-----------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| <b>Пил (сумарно)</b>              | 42,94                                      | Зменшення маси металу та моделі | -                            | 23,87                      | <b>19,07</b>                     |
| - з них від плавлення             | 1,04                                       | Метал                           | 57,4                         | 0,60                       | 0,44                             |
| - з них від підготовки матеріалів | 19,20                                      | Метал                           | 57,4                         | 11,02                      | 8,18                             |

|                               |       |                                           |      |      |             |
|-------------------------------|-------|-------------------------------------------|------|------|-------------|
| - з них від обрубки і очистки | 16,40 | Метал                                     | 57,4 | 9,41 | 6,99        |
| <b>СО (сумарно)</b>           | 6,06  | Зменшен<br>ня маси<br>металу та<br>моделі | -    | 3,28 | <b>2,78</b> |
| - з них від плавлення         | 0,58  | Метал                                     | 57,4 | 0,33 | 0,25        |
| - з них від термообробки      | 2,40  | Метал                                     | 57,4 | 1,38 | 1,02        |
| <b>Стирола оксид</b>          | 0,76  | Зменшен<br>ня маси<br>моделі<br>(ППС)     | 57,4 | 0,44 | <b>0,32</b> |
| <b>Толуол</b>                 | 0,256 | Зменшен<br>ня маси<br>моделі<br>(ППС)     | 57,4 | 0,15 | <b>0,11</b> |
| <b>Бензол</b>                 | 0,22  | Зменшен<br>ня маси<br>моделі<br>(ППС)     | 57,4 | 0,13 | <b>0,09</b> |

Розрахунок виконано для умов, коли 57,4 % внутрішнього об'єму виливка заміщено неметалевим наповнювачем. Для спрощення прийнято, що маса моделі також зменшується пропорційно заміщеному об'єму. Викиди від виготовлення та сушіння самого наповнювача не враховано.

### Порівняльний аналіз

Для оцінки екологічного ефекту від застосування неметалевого наповнювача порівняно маси суцільнолитого та бінарного сегментів модуля на прикладі сталевих виливків. Вихідні дані та результати розрахунку наведено в таблиці 5.1.

Як видно з таблиці 5.1, заміщення внутрішнього об'єму сегмента рідкоскляним наповнювачем дозволяє зменшити масу металевих складових на 57,4 % порівняно з суцільнолитим аналогом. Оскільки основна частка викидів

шкідливих речовин (продукти плавлення, пил, оксиди вуглецю та азоту) пропорційна масі переплавленого металу, слід очікувати співмірного зниження викидів на етапах плавлення, заливання та фінішних операцій.

Хоча кількісний розрахунок у таблиці 5.4 виконано для сірого чавуну, сам підхід до оцінки зменшення викидів може бути використаний і для сталевих виливків за умови застосування питомих показників, характерних для відповідного сплаву, плавильного агрегату та технологічної схеми.

Відповідно, для умов річного випуску 1000 т литва перехід на бінарну конструкцію модуля забезпечує кратне зменшення валових викидів за основними забруднюючими речовинами, що утворюються на стадіях, пов'язаних із масою металу, та продуктами деструкції моделі. Це підтверджує екологічну доцільність застосування неметалевих наповнювачів як одного з напрямків декарбонізації ливарного виробництва.

Одержані розрахункові оцінки відповідають підходам до зменшення викидів шкідливих речовин при виготовленні литих конструкцій із неметалевим наповнювачем, згідно з яким екологічний ефект досягається за рахунок одночасного скорочення маси металу та маси пінополістиролової моделі, що газифікується під час заливання [98].

## **5.5 Технологічні рекомендації щодо виготовлення бінарних виливків із неметалевим наповнювачем**

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень, а також перевірки технології на дослідному сегменті захисного модуля, сформульовано технологічні рекомендації для виготовлення бінарних виливків системи «залізовуглецевий сплав — неметалевий наповнювач» методом лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ).

**Вибір матеріалу металевої оболонки.** Для металевої оболонки бінарних виливків рекомендовано застосовувати сірий чавун СЧ200, високоміцний чавун ВЧ 350-22 або сталь 35Л — залежно від функціонального

призначення виробу. Сталь 35Л забезпечує високу конструкційну міцність і рекомендована для відповідальних виливків типу «Модуль 405×410 мм». Сірий чавун СЧ200 доцільний для несучих елементів (станин тощо), де переважають статичні навантаження, а на перший план виходять жорсткість і віброгасіння. Крім того, СЧ200 технологічний та економічний у виробництві, а його добра рідкоплинність сприяє формуванню розвиненої контактної зони з рідкоскляним наповнювачем.

Для серійного випуску бінарних захисних модулів перспективною є заміна сірого чавуну СЧ200 на високоміцний чавун ВЧ 350-22. Останній характеризується суттєво вищими механічними властивостями: згідно з ДСТУ 3925-99, його відносне видовження становить не менше 22 %, тоді як сірий чавун СЧ200 практично не має пластичності. За рівнем ударної в'язкості та пластичності ВЧ 350-22 наближається до сталевих литих матеріалів [73], що може забезпечити підвищення захисних властивостей металеві оболонки без зміни принципової технологічної схеми, однак потребує уточнення температури заливання, режиму модифікування та товщини оболонки для конкретного типорозміру вилівка. Товщину металеві оболонки слід уточнювати залежно від геометрії виробу, матеріалу оболонки, умов заливання та вимог до механічної стійкості конструкції.

**Склад та приготування неметалевого наповнювача.** Неметалевий наповнювач рекомендовано виготовляти на основі кварцового піску та натрієвого рідкого скла. Оптимальним є використання натрієвого рідкого скла із силікатним модулем 2,9 та природного річкового кварцового піску. Застосування непросіяного природного піску замість каліброваного дозволяє суттєво знизити собівартість наповнювача в умовах реального виробництва. Таке поєднання компонентів забезпечує формування вогнетривкого зернового каркасу з силікатним зв'язувальним компонентом, який після теплової дії розплаву зберігає достатню залишкову міцність [14, 74].

Раціональний вміст рідкого скла в наповнювачі залежить від матеріалу металевої оболонки (табл. 5.5). Недостатня кількість зв'язувального компонента спричиняє викришування наповнювача та низький опір пробиванню, тоді як надмірна — погіршує газопроникність суміші та ускладнює рівномірне ущільнення.

Таблиця 5.5 Рекомендований вміст рідкого скла в наповнювачі

| Матеріал металевої оболонки | Вміст рідкого скла на 100 г піску, г | Масова частка рідкого скла, % |
|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| Чавун (СЧ200, ВЧ 350-22)    | 12–14                                | 10,7–12,3                     |
| Сталь 35Л                   | 14–16                                | 12,3–13,8                     |

Рідкоскляну суміш готують, досягаючи рівномірного розподілу зв'язувального компонента по поверхні зерен піску — без грудок, розшарувань та ділянок із локальним надлишком рідкого скла. Ущільнювати наповнювач можна вібрацією або на лабораторному копрі (у проведених дослідженнях — три удари вантажем 6,35 кг з висоти 0,05 м). Незалежно від обраного способу, необхідно забезпечити стабільну задану щільність суміші для всіх виливків, що виготовляються.

**Підготовка моделі та формування.** Рідкоскляний наповнювач закладають у внутрішню порожнину пінополістиролової моделі до заливання. Поверхню наповнювача, що контактуватиме з розплавом, не покривають — відкритий контакт металу з наповнювачем необхідний для його інтенсивного прогрівання, часткового проникнення розплаву в пори та формування перехідного шару.

Протипригарне покриття наносять лише на зовнішню поверхню моделі та ливникову систему (товщина шару 0,7–1,0 мм). Сушити покриття можна за кімнатної температури протягом 24 годин або за температури  $55 \pm 5$  °C упродовж 10 годин. Формування здійснюють у контейнерній опоці із сухим

кварцовим піском. Рекомендована товщина донної піщаної підсипки становить 50–100 мм. Ущільнення піску проводять пошарово, із вібрацією по 10–15 с на кожен шар. Слід враховувати, що надмірна тривалість вібрації може спричинити зміщення або розуцільнення наповнювача всередині моделі. Після завершення формування опоку накривають герметизувальною плівкою, засипають верхнім шаром піску (50–100 мм) і підключають до вакуумної системи.

**Заливання, охолодження та фінішні операції.** Температуру заливання вибирають залежно від матеріалу металевої оболонки: для чавуну СЧ200 та ВЧ 350-22 — 1425–1430 °С, для сталі 35Л — 1610 °С. Схему підведення металу обирають з урахуванням геометрії виливка, умов газовідведення, фронту потоку розплаву та стійкості модельного блока [66, 87]. Для виготовлення дослідних сегментів застосовували верхнє підведення через вертикальний стояк і горизонтальний колектор, що забезпечило надійне заповнення форми та рівномірне формування оболонки навколо наповнювача. Для інших типорозмірів виливків ливникову систему доцільно уточнювати за результатами попереднього комп'ютерного моделювання заповнення та аналізу газового режиму форми [9, 60, 66].

Після заливання виливок витримують у формі до повного охолодження й стабілізації оболонки та наповнювача. Передчасне вибивання неприпустиме, оскільки саме в цей період завершується формування перехідного шару між металом і наповнювачем. Після охолодження виконують вибивання, відокремлюють ливникову систему й очищають поверхню виливка.

**Контроль технологічного процесу.** Під час виготовлення бінарних виливків рекомендовано здійснювати контроль таких параметрів:

- на етапі підготовки моделі: щільність пінополістиролової моделі, маса наповнювача, вміст рідкого скла;
- на етапі формування: режим ущільнення, товщина та цілісність протипригарного покриття, температура сушіння;

- на етапі заливання та охолодження: температура розплаву, тривалість охолодження виливка у формі;
- контроль готової продукції: маса готового виливка, відповідність геометричних розмірів кресленику.

Зведені технологічні параметри, рекомендовані для виготовлення бінарних виливків із неметалевим наповнювачем методом ЛГМ, наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 Зведені технологічні рекомендації

| Параметр                               | Чавунна оболонка (СЧ200, ВЧ 350-22)                | Сталева оболонка (35Л) |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------|
| Матеріал наповнювача                   | Кварцовий пісок + натрієве рідке скло (модуль 2,9) |                        |
| Масова частка рідкого скла, %          | 10,7–12,3                                          | 12,3–13,8              |
| Товщина протипригарного покриття, мм   | 0,7–1,0                                            | 0,7–1,0                |
| Температура сушіння покриття, °С / год | 55±5 (10 год) або 20...25 (24 год)                 |                        |
| Температура заливання, °С              | 1425–1430 °С                                       | 1610 °С                |
| Тривалість охолодження у формі         | До повного охолодження                             |                        |

Наведені рекомендації визначають основні технологічні параметри для виготовлення бінарних виливків системи «залізовуглецевий сплав — неметалевий наповнювач» методом ЛГМ і можуть бути використані для розроблення виробничих технологічних інструкцій.

## Висновки до розділу 5

1. На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано передумови розроблення технології виготовлення бінарних виливків системи «залізовуглецевий сплав - неметалевий наповнювач» методом лиття за моделями, що газифікуються. Показано, що на

відміну від суцільнолитого виливка, у бінарному виливку частина металевого об'єму заміщується неметалевим наповнювачем, який залишається у виробі та працює разом із металевою оболонкою через сформований перехідний шар.

2. Розроблено технологічну схему виготовлення виливків із інтегрованим неметалевим наповнювачем, яка включає виготовлення пінополістиролової моделі з внутрішньою порожниною, підготовку й ущільнення рідкоскляного наповнювача, складання модельного блока, нанесення протипригарного покриття лише на зовнішню поверхню моделі, формування у сухому кварцовому піску, вакуумування, заливання металу, охолодження, вибивання та контроль якості готового виливка.

3. Встановлено, що умовою одержання бінарного виливка є відкритий контакт розплаву з неметалевим наповнювачем. Відсутність протипригарного покриття на внутрішній поверхні моделі забезпечує прогрівання рідкоскляної суміші, часткове проникнення металу в пори наповнювача та формування перехідного шару, який сприяє механічному зчепленню металевої оболонки з внутрішнім неметалевим об'ємом.

4. Проведена дослідно-промислова перевірка технології на сегменті бінарного модуля підтвердила можливість реалізації запропонованої технологічної схеми в умовах повного ливарного циклу. Під час виготовлення дослідного сегмента забезпечено формування металевої оболонки, збереження рідкоскляного наповнювача у внутрішньому об'ємі та утворення перехідного шару між металом і наповнювачем.

5. Визначено основні технологічні параметри, які необхідно контролювати під час виготовлення бінарних виливків: склад рідкоскляного наповнювача, рівномірність його ущільнення у моделі, товщину та якість протипригарного покриття, режим сушіння, параметри формування й вакуумування, температуру заливання металу та тривалість охолодження виливка у формі. Передчасне вибивання є небажаним, оскільки в період

охолодження завершується формування перехідного шару і стабілізація системи «оболонка — наповнювач».

6. Попередня оцінка техніко-екологічного ефекту показала, що заміщення частини металевого об'єму рідкоскляним наповнювачем дозволяє істотно знизити металоємність і масу виробу. Для виливка типу «Модуль 405×410 мм» прогнозоване зменшення витрати сталі становить 57,4 %, а зменшення загальної маси виробу з урахуванням наповнювача 37,7 %. Додатково очікується зменшення маси пінополістиролової моделі, витрат шихтових матеріалів та енергії на плавлення, а також зниження обсягу продуктів термодеструкції моделі.

7. Сформульовано технологічні рекомендації щодо виготовлення бінарних виливків із неметалевим наповнювачем. Для металеві оболонки доцільно застосовувати сірий чавун СЧ200, високоміцний чавун ВЧ 350-22 або сталь 35Л залежно від функціонального призначення виробу. Як наповнювач рекомендовано використовувати кварцовий пісок із натрієвим рідким склом силікатного модуля 2,9; раціональний вміст рідкого скла становить 12–14 г на 100 г піску (10,7-12,3 мас.%) для чавунних оболонок і 14–16 г на 100 г піску (12,3-13,8 мас.%) для сталевих оболонок.

8. Розроблена та перевірена технологія може бути використана як основа для подальшого дослідно-промислового впровадження бінарних литих виробів зі зниженою металоємністю та функціонально заповненим внутрішнім об'ємом. Отримані результати підтверджують технологічну доцільність застосування ЛГМ-процесу для виготовлення виливків із інтегрованими неметалевими наповнювачами.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання: розроблено технологію одержання легковагих бінарних виливків з металевою оболонкою (із сірих чавунів СЧ200...СЧ300 ДСТУ 8833-2019 та конструкційних Сталей 25Л...55Л ДСТУ 8781:2018) з інтегрованими в оболонку неметалевими функціональними наповнювачами методом лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес). На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано наступні висновки:

1. На основі аналітичного огляду сучасних класифікацій, методів одержання та застосування литих легковагих бінарних (композиційних) конструкцій встановлено, що найбільш ефективним технологічним методом для їх одержання є ЛГМ-процес. Визначено, що ключовими факторами, які впливають на металоємність, ресурс, рівень навантаження в екстремальних умовах таких конструкцій є твердість, густина наповнювачів, вміст рідкого скла, які дають змогу одержати високу міцність сумішей наповнювачів, утворення міцного перехідного шару на межі «оболонка - наповнювач» та енергетичну протидію переміщенню стороннього металевого тіла. Виявлено невирішені питання: відсутність кількісної залежності впливу вмісту рідкого скла на залишкову міцність наповнювача, недостатню дослідженість процесу тепломасообміну в системі «метал - наповнювач», а також відсутність технології одержання нового типу литих конструкцій за ЛГМ-процесом.
2. Розроблено фізичну модель процесу взаємодії розплаву з наповнювачем, яка враховує газифікацію пінополістиролової моделі, гідродинаміку потоку, капілярне просочення, теплообмін на межі поділу, а також специфічні фактори ЛГМ-процесу (газовий режим, вплив піролітичного вуглецю). Сформульовано математичну модель тепломасообміну на основі узагальненого рівняння теплопровідності в формі ентальпії з урахуванням фазових перетворень, неідеального теплового контакту на межі «метал - наповнювач» (з термічним

опором  $R_c$ ) та конвективного переносу в рідкій фазі через ефективний коефіцієнт теплопровідності.

3. Методом обчислювального експерименту встановлено, що тип наповнювача визначає характер тепломасообміну в ливарній формі. Для РСС ( $\lambda = 2,58$  Вт/(м·К)) характерним є значний градієнт температури на межі поділу (до 150 °С) та повільний прогрів центральних зон, що сприяє глибокому капілярному просоченню (товщина перехідного шару 0,5 - 1,5 мм). Для керамзиту ( $\lambda = 0,15$  Вт/(м·К)) спостерігається швидкий рівномірний прогрів за рахунок конвекції та незначні градієнти (5 - 10 °С), що обумовлює поверхневу фізико-хімічну взаємодію (товщина шару 0,1 - 0,3 мм). Тривалість твердіння вилівка з РСС становить ~40 с, з керамзитом – ~160 с.
4. Розроблено оригінальну методику визначення залишкової міцності неметалевого функціонального наповнювача шляхом оцінки роботи пробивання (гальмування) рухомого тіла, що дозволило кількісно порівнювати різні склади та обґрунтовувати вибір наповнювача для захисних конструкцій і вперше експериментально встановлено кількісні залежності роботи пробивання (гальмування) рухомого тіла:
  - вміст рідкого скла в наповнювачі суттєво впливає на роботу пробивання: так, функціональна суміш з кварцового піску (вміст РС 4 - 8 %) в оболонці з СЧ200 та Сталь 35Л (РС 4 - 12 %) має низьку залишкову міцність і робота пробивання становить менше ніж 80 та 140 Дж відповідно. При вмісті РС 12 - 14% (для СЧ200) робота пробивання досягає величини 540...700 Дж, а при вмісті РС 14 - 16 % (для Сталі 35 Л) – 575...1200 Дж, тобто підвищується в 4...9 разів. За таких значень роботи гальмування суміш на кварцовому піску з РС реально протидіє пробиванню металевими частками, кінетична енергія яких при контакті з поверхнею наповнювача сталевого бінарного модуля знаходиться в межах 1500...2500 Дж, що дає змогу прогнозувати занурення металевого тіла в наповнювач на глибину 20...40 мм.

5. Встановлено, що використання неметалевих наповнювачів замість суцільного металу дозволяє зменшити викиди шкідливих речовин при ЛГМ-процесі мінімум на 50 % (зокрема, викиди пилу скорочуються на ~20 т/рік, СО – на ~3 т/рік при річному обсязі виробництва 1000 т).
6. Мікроструктурним аналізом підтверджено, що збільшення вмісту рідкого скла в РСС до 16 % сприяє формуванню суцільного щільного перехідного шару та покращує мікроструктуру чавунної оболонки в зоні контакту: розподіл графіту стає більш рівномірним, кількість вторинного цементиту зменшується з 4 % до 2 %, що позитивно впливає на в'язкість металеві оболонки. Мікротвердість чавунної оболонки в зоні контакту знижується з 2390 до 1785 МПа, тоді як мікротвердість перехідного шару зростає до 2765 МПа.
7. Термодинамічним аналізом (розрахунком енергії Гіббса) підтверджено ймовірність утворення силікатних фаз  $\text{FeSiO}_3$  ( $\Delta G^\circ \approx -60,4$  кДж/моль) та  $\text{MnSiO}_3$  ( $\Delta G^\circ \approx -245,6$  кДж/моль) на межі поділу «метал – наповнювач» при температурах заливання, що забезпечує додаткове зміцнення перехідного шару. Ідентифіковано основні продукти термодеструкції пінополістиролу в умовах ЛГМ (толуол, пентан, бензол, оксид стиролу, піролітичний вуглець). Показано, що газовий тиск продуктів термодеструкції не перешкоджає формуванню якісного перехідного шару при оптимальних параметрах (вміст РС  $\geq 12$  %, вакуумування форми).
8. Розроблено інженерну методику вибору оптимальної товщини наповнювача для захисних споруд, яка ґрунтується на експериментальних залежностях роботи пробивання від вмісту РС та коефіцієнті пропорційності між товщиною стінки і перехідним шаром. Наведено приклад розрахунку для сталевого модуля з РСС (товщина стінки 10 мм, товщина перехідного шару ~4 мм, рекомендована загальна товщина наповнювача 10 мм). Запропоновану технологію та рекомендації доцільно впроваджувати при виготовленні литих захисних модулів (огорожувальних конструкцій, укриттів) для підвищення їх балістичної стійкості та зниження маси.

9 Розроблено технологічний процес виготовлення легковагих бінарних (композиційних) литих конструкцій (сегментів захисних модулів) за моделями, що газифікуються, який пройшов лабораторні, дослідно-промислові перевірки і впровадження, включаючи сегменти модулів з чавуну СЧ200 та Сталі 35Л з наповнювачами з РСС та керамзит, застосування яких дало змогу встановити, що застосування неметалевих наповнювачів дозволяє зменшити масу виливків до 30...35 % (на прикладі сегмента модуля), знизити витрати рідкого металу на 35...50 %, підвищити коефіцієнт використання металу та вихід придатного до 0,9 та 75...85%, що в кінцевому варіанті дасть можливість скоротити собівартість виготовлення таких захисних легковагих конструкцій за ціною, яка не перевищить аналогічну продукцію з бетону та залізобетону, а за вагою в 5...8 разів нижчою.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Miracle D. B. Metal matrix composites — From science to technological significance. *Composites Science and Technology*. 2005. Vol. 65, No. 15–16. P. 2526–2540. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.05.027.
2. Kaczmar J. W., Pietrzak K., Włosiński W. The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000. Vol. 106, No. 1–3. P. 58–67. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00639-7.
3. Kumar P. A., Rohatgi P., Weiss D. 50 Years of Foundry-Produced Metal Matrix Composites and Future Opportunities. *International Journal of Metalcasting*. 2020. Vol. 14, No. 2. P. 291–317. DOI: 10.1007/s40962-019-00375-4.
4. Tang S. L., Gao Y. M., Li Y. F. Recent developments in fabrication of ceramic particle reinforced iron matrix wear resistant surface composite using infiltration casting technology. *Ironmaking & Steelmaking*. 2014. Vol. 41, No. 8. P. 633–640. DOI: 10.1179/1743281213Y.00000000175.
5. Moreira A. B., Ribeiro L. M. M., Lacerda P., Vieira M. F. Characterization of Iron-Matrix Composites Reinforced by In Situ TiC and Ex Situ WC Fabricated by Casting. *Metals*. 2021. Vol. 11, No. 6. Article 862. DOI: 10.3390/met11060862.
6. Malaki M., Fadaei Tehrani A., Niroumand B., Gupta M. Wettability in Metal Matrix Composites. *Metals*. 2021. Vol. 11, No. 7. Article 1034. DOI: 10.3390/met11071034.
7. Li Y., Li C., Tang S., Zheng Q., Wang J., Zhang Z., Wang Z. Interfacial Bonding and Abrasive Wear Behavior of Iron Matrix Composite Reinforced by Ceramic Particles. *Materials*. 2019. Vol. 12, No. 22. Article 3646. DOI: 10.3390/ma12223646.
8. An N. Preparation of SiC-Low Chromium Cast Iron Composite Material by Cast-Infiltration. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 189–193. P. 3972–3975. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3972.
9. Shinsky O., Kvasnytska I., Shalevska I., Kaliuzhnyi P., Neima O. Devising a technology for manufacturing hollow cast steel structures with composite and

reinforced non-metallic functional filler. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6, No. 12 (132). P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.318553.

10. Shinsky O., Shalevska I., Kvasnytska I., Kaliuzhnyi P., Neima O., Shalevskyi A. Cast structures with composite and reinforced non-metallic functional filler. *Structural materials: manufacture, properties, conditions of use*. Kharkiv : TECHNOLOGY CENTER PC, 2025. P. 109–146. DOI: 10.15587/978-617-8360-17-7.ch4.

11. Anwar N., Jalava K., Orkas J. Experimental Study of Inorganic Foundry Sand Binders for Mold and Cast Quality. *International Journal of Metalcasting*. 2023. Vol. 17. P. 1697–1714. DOI: 10.1007/s40962-022-00897-4.

12. Xin F., Liu W., Song L., Li Y. Modification of inorganic binder used for sand core-making in foundry practice. *China Foundry*. 2020. Vol. 17. P. 341–346. DOI: 10.1007/s41230-020-0018-2.

13. Stachowicz M., Granat K., Nowak D. Influence of water-glass grade and quantity on residual strength of microwave-hardened moulding sands. Part 1. *Archives of Foundry Engineering*. 2011. Vol. 11, No. 1. P. 93–98.

14. Лютий Р. В., Гурія І. М. Формувальні матеріали : підручник для студентів спеціальності 136 «Металургія», освітньої програми «Комп'ютеризовані процеси лиття». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 257 с.

15. Берлізева Т. В., Пономаренко О. І., Євтушенко Н. С. Міцність ливарних форм і стрижнів на основі рідкоскляних холоднотвердіючих сумішей : монографія. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. 96 с.

16. Дьяченко М. М., Корнієць І. В. Дослідження процесів формування перехідного шару на межі сірий чавун — інтегрований неметалевий наповнювач при одержанні легковагових виливків. *Метал та лиття України*. 2025. Т. 33, № 3–4 (342–343). С. 119–130. DOI: 10.15407/steelcast2025.03-04.119.

17. Matsushita T., Belov I., Svidró J. T., Svidró J., Diószegi A. Analysis of the Penetration Behavior of Molten Cast Iron into the Sand Mold. *International Journal of Metalcasting*. 2024. Vol. 18. P. 2254–2267. DOI: 10.1007/s40962-023-01169-5.
18. Ramanathan A., Krishnan P. K., Muraliraja R. A review on the production of metal matrix composites through stir casting — Furnace design, properties, challenges, and research opportunities. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 42. P. 213–245. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.04.017.
19. Hashim J., Looney L., Hashmi M. S. J. Metal matrix composites: production by the stir casting method. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999. Vol. 92–93. P. 1–7. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00118-1.
20. Surappa M. K. Aluminium matrix composites: challenges and opportunities. *Sadhana*. 2003. Vol. 28, No. 1–2. P. 319–334. DOI: 10.1007/BF02717141.
21. Naher S., Brabazon D., Looney L. Simulation of the stir casting process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 143–144. P. 567–571. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00368-6.
22. Mortensen A. Pressure-infiltration processing of reinforced aluminum. *JOM*. 1993. Vol. 45. P. 36–43. DOI: 10.1007/BF03223364.
23. Yang J., Chung D. D. L. Casting particulate and fibrous metal-matrix composites by vacuum infiltration of a liquid metal under an inert gas pressure. *Journal of Materials Science*. 1989. Vol. 24, No. 10. P. 3605–3612. DOI: 10.1007/BF02385746.
24. Verma R. K., Parganiha D., Chopkar M. A review on fabrication and characteristics of functionally graded aluminum matrix composites fabricated by centrifugal casting method. *SN Applied Sciences*. 2021. Vol. 3. Article 227. DOI: 10.1007/s42452-021-04200-8.
25. Rajan T. P. D., Pillai R. M., Pai B. C. Centrifugal casting of functionally graded aluminium matrix composite components. *International Journal of Cast*

Metals Research. 2008. Vol. 21, No. 1–4. P. 214–218. DOI: 10.1179/136404608X361972.

26. Watanabe Y., Inaguma Y., Sato H., Miura-Fujiwara E. A Novel Fabrication Method for Functionally Graded Materials under Centrifugal Force: The Centrifugal Mixed-Powder Method. *Materials*. 2009. Vol. 2, No. 4. P. 2510–2525. DOI: 10.3390/ma2042510.

27. El-Galy I. M., Ahmed M. H., Bassiouny B. I. Characterization of functionally graded Al-SiCp metal matrix composites manufactured by centrifugal casting. *Alexandria Engineering Journal*. 2017. Vol. 56, No. 4. P. 371–381. DOI: 10.1016/j.aej.2017.03.009.

28. Dulaska A., Studnicki A., Szajnar J. Reinforcing cast iron with composite insert. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2017. Vol. 62, No. 1. P. 355–357. DOI: 10.1515/amm-2017-0054.

29. Sun G.-J., Qi W., Hou M. Discussion of ceramic bar reinforced TWIP steel composite structure. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2022. Vol. 29. P. 481–487. DOI: 10.1515/secm-2022-0173.

30. Ясюков В. В., Лысенко Т. В., Волянская К. В. Композиционные отливки с регулируемым поверхностным слоем. *Металл и литьё Украины*. 2016. № 4 (275). С. 18–23.

31. Wróbel T., Przyszlak N., Dulaska A. Technology of Alloy Layers on Surface of Castings. *International Journal of Metalcasting*. 2019. Vol. 13. P. 673–678. DOI: 10.1007/s40962-018-00304-x.

32. Moreira A. B., Ribeiro L. M. M., Lacerda P., Vieira M. F. Microstructural Characterization of TiC–White Cast-Iron Composites Fabricated by In Situ Technique. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 1. Article 209. DOI: 10.3390/ma13010209.

33. Druschitz A. P., Williams C. B., Wood B. Metal-Monolithic Ceramic/Metal Composite Castings Produced Using 3D Printed Sand Molds and Cores. *TechConnect Briefs*. 2017. Vol. 4. P. 978–981.

34. Aso S., Goto S., Komatsu Y., Ike H., Shimizu K. Composite reinforcement of the surface of cast iron by WC powder inserts. *International Journal of Cast Metals Research*. 2003. Vol. 16, No. 4. P. 345–350. DOI: 10.1080/13640461.2003.11819607.
35. UA 78534 U. Спосіб виробництва виливок з макроретерогенного композиційного матеріалу. 2013.
36. UA 85912 U. Матеріал із зносостійким композиційним шаром. 2013.
37. UA 93135 U. Спосіб виготовлення макроретерогенних композиційних матеріалів. 2014.
38. UA 114099 C2. Зносостійкий матеріал і система та спосіб створення зносостійкого матеріалу. 2017.
39. Калюжний П. Б., Слюсарев В. А., Калашник Д. О. Армування виливків за технологією лиття за моделями, що газифікуються. *Металознавство та обробка металів*. 2017. № 4. С. 48–53.
40. Rosso M. Ceramic and metal matrix composites: routes and properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 175, No. 1–3. P. 364–375. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.038.
41. Taha M. A. Practicalization of cast metal matrix composites (MMCCs). *Materials & Design*. 2001. Vol. 22, No. 6. P. 431–441. DOI: 10.1016/S0261-3069(00)00077-7.
42. UA 139560 U. Спосіб виробництва броньової перешкоди з високоміцного чавуну у ливарних формах з сипкого піску / Дорошенко В. С., Шинський В. О. 2020.
43. Islam M. R. I., Zheng J. Q., Batra R. C. Ballistic Performance of Ceramic and Ceramic-Metal Composite Plates with JH1, JH2 and JHB Material Models. *International Journal of Impact Engineering*. 2020. Vol. 137. Article 103469. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103469.

44. Sanusi O. M., Oyelaran O. A., Badmus J. A. Ballistic study of alumina ceramic-steel composite for structural applications. *Journal of Ceramic Processing Research*. 2020. Vol. 21, No. 4. P. 501–507. DOI: 10.36410/jcpr.2020.21.4.501.

45. Гнилоскуренко С. В., Кондратюк С. Є. Новітні конструкційні матеріали з орієнтованою пористою структурою — газари. *Металознавство та обробка металів*. 2022. Vol. 28 (102). С. 22–37. DOI: 10.15407/mom2022.02.022.

46. Adams R. B., Pask J. A. Fundamentals of Glass-to-Metal Bonding: VII. Wettability of Iron by Molten Sodium Silicate Containing Iron Oxide. *Journal of the American Ceramic Society*. 1961. Vol. 44, No. 9. P. 430–433. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1961.tb13751.x.

47. Sobczak N., Sobczak J. J., Kolev M., Drenchev L., Turalska P., Homa M., Kudyba A., Bruzda G. High-Temperature Interaction of Molten Gray Cast Iron with  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2\text{--SiO}_2$  Ceramic. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29. P. 2499–2505. DOI: 10.1007/s11665-020-04695-z.

48. Цибрик А. Н. Физико-химические процессы в контактной зоне металл–форма. Киев : Наукова думка, 1977. 210 с.

49. Stachowicz M., Granat K., Nowak D. Influence of water-glass grade and quantity on residual strength of microwave-hardened moulding sands. Part 2. *Archives of Foundry Engineering*. 2011. Vol. 11, No. 2. P. 143–148.

50. Dobosz S. M., Major-Gabryś K. The mechanism of improving the knock-out properties of moulding sands with water glass. *Archives of Foundry Engineering*. 2008. Vol. 8, No. 1. P. 37–42.

51. Kmita A., Hutera B. Water Glass Modification and its Impact on the Mechanical Properties of Moulding Sands. *Archives of Foundry Engineering*. 2013. Vol. 13, No. 2. P. 81–84. DOI: 10.2478/afe-2013-0041.

52. Jakubski J., Halejcio D. Improving the Knock-Out Properties of Moulding Sands with an Inorganic Binder. *Archives of Foundry Engineering*. 2025. Vol. 25, No. 2. P. 89–93. DOI: 10.24425/afe.2025.153800.

53. Subasri R., Näfe H. Phase evolution on heat treatment of sodium silicate water glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2008. Vol. 354, No. 10–11. P. 896–900. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2007.08.037.
54. Weldes H. H., Lange K. R. Properties of soluble silicates. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1969. Vol. 61, No. 4. P. 29–44. DOI: 10.1021/ie50712a008.
55. Gowrishankar M. C., Hiremath P., Shettar M., Sharma S., Satish Rao U. Experimental validity on the casting characteristics of stir cast aluminium composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, No. 3. P. 3340–3347. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.028.
56. Rähmer P., Dommaschk C., Wolf G. Production of Ceramic Steel Composite Castings Through Infiltration. *Austenitic TRIP/TWIP Steels and Steel-Zirconia Composites* / eds. H. Biermann, C. G. Aneziris. Cham : Springer, 2020. P. 113–137. DOI: 10.1007/978-3-030-42603-3\_4.
57. Sree Manu K. M., Raag L. A., Rajan T. P. D., Gupta M., Pai B. C. Liquid Metal Infiltration Processing of Metallic Composites: A Critical Review. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. Vol. 47. P. 2799–2819. DOI: 10.1007/s11663-016-0751-5.
58. Wannasin J., Flemings M. C. Fabrication of metal matrix composites by a high-pressure centrifugal infiltration process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 169, No. 2. P. 143–149. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.03.004.
59. Olejnik E., Szymański Ł., Tokarski T., Tumidajewicz M. TiC-based local composite reinforcement obtained in situ in ductile iron based castings with use of rod preform. *Materials Letters*. 2018. Vol. 228. P. 277–280. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.03.159.
60. Liu Y., Bakhtiyarov S. I., Overfelt R. A. Numerical modeling and experimental verification of mold filling and evolved gas pressure in lost foam casting process. *Journal of Materials Science*. 2002. Vol. 37. P. 2997–3003. DOI: 10.1023/A:1016029300243.

61. Корнієць І. В. Теплофізичні особливості формування литих композиційних і армованих заготовок : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04. Київ, 1994. 203 с.
62. Лейбензон В. О. та ін. Тверднення металів і металевих композицій. Київ : Наукова думка, 2009.
63. Тарасевич Н. И., Корниец И. В., Затуловский А. С. Моделирование процесса формирования литьем композиционных материалов. Процессы литья. 1995. № 4. С. 40–49.
64. Тарасевич М. І., Шинський О. Й., Шалевська І. А., Корнієць І. В. Вплив масового співвідношення армуючого елемента та матричного сплаву на формування гетерогенного виливка. Процеси лиття. 2023. № 3 (153). С. 25–33.
65. Тарасевич М. І., Шинський О. Й., Шалевська І. А., Корнієць І. В., Гнилокурченко С. В., Дьяченко М. М. Вплив діаметра та об'ємної частки армуючих елементів на формування композиційних виливків. Метал та лиття України. 2025. № 2 (341). С. 30–37. DOI: 10.15407/steelcast2025.02.030.
66. Калюжний П. Б., Шалевська І. А., Шинський О. Й. Розроблення ливарної технології одержання литого захисного модулю за моделями, що газифікуються. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2023. № 4. С. 12–17. DOI: 10.15588/1607-6885-2023-4-2.
67. ДСТУ Б В.2.7-131:2007. Будівельні матеріали. Пісок кварцовий. Технічні умови. Київ : Мінрегіонбуд України, 2007.
68. Скло рідке. Технічні умови : ТУ У 20.1-00293255-004:2021.
69. Дорошенко В. С., Калюжний П. Б., Дьяченко М. М. Лиття за газопроникними полімерними моделями, що газифікуються з відкачуванням по вентканалах газів із робочої порожнини форми. Процеси лиття. 2024. № 2 (156). С. 19–28. DOI: 10.15407/plit2024.02.019.
70. ДСТУ 8833:2019. Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом. Загальні технічні умови. Чинний від 2020-01-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 11 с.

71. ДСТУ 8781:2018. Виливки зі сталі. Загальні технічні умови. Чинний від 2019-01-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
72. Сталь 35Л. Evек GmbH : вебсайт. URL: <https://evek.com.ua/materials/stal-35l.html> (дата звернення: 15.03.2026).
73. ДСТУ 3925-99. Чавун з кулястим графітом для виливків.
74. Медведев Я. И., Валисовский И. В. Технологические испытания формовочных материалов. 2-е изд., испр. и доп. Москва : Машиностроение, 1973. 312 с.
75. Дьяченко М. М., Капюжний П. Б., Шалевська І. А., Гнилокурченко С. В., Овсянников В. О. Визначення впливу вмісту рідкого скла в наповнювачі чавунних і сталевих литих модулів на показники стійкості до пробивання. Метал та лиття України. 2026. № 2 (345). С. 8–17. DOI: 10.15407/steelcast2026.02.008.
76. Дорошенко С. П. Взаимодействие песчаной формы с отливкой. Киев, 1991.
77. Stange M., Dreyer M. E., Rath H. J. Capillary driven flow in circular cylindrical tubes. *Physics of Fluids*. 2003. Vol. 15, No. 9. P. 2587–2601. DOI: 10.1063/1.1596913.
78. Sangiorgi R., Muolo M. L., Chatain D., Eustathopoulos N. Wettability and Work of Adhesion of Nonreactive Liquid Metals on Silica. *Journal of the American Ceramic Society*. 1988. Vol. 71, No. 9. P. 742–748. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1988.tb06407.x.
79. Endo R., et al. Potential Utilization of Iron Oxidation Reaction Heat for the Generation of SiO<sub>2</sub>–FeO System Melts. *International Journal of Thermophysics*. 2024. Vol. 45. Article 44. DOI: 10.1007/s10765-024-03338-y.
80. Barin I. *Thermochemical Data of Pure Substances*. 3rd ed. Weinheim : VCH Verlagsgesellschaft, 1995.
81. Голофаєв А. М., Лагута В. І., Хінчагов Г. В. Технологія ливарної форми : навч. посіб. Луганськ : Вид-во СНУ, 2001. 300 с.

82. Лясс А. М. Быстротвердеющие формовочные смеси. Москва : Машиностроение, 1965. 332 с.
83. Тодоров Р. П., Пешев П. Ц. Дефекты в отливках из черных сплавов : сокр. пер. с болг. / пер. В. Н. Иванова. Москва : Машиностроение, 1984. 184 с.
84. Stachowicz M., Granat K., Nowak D., Haimann K. Effect of hardening methods of moulding sands with water glass on structure of bonding bridges. Archives of Foundry Engineering. 2010. Vol. 10, No. 3. P. 123–128.
85. Zitian F., Wenming J., Fuchu L., Botao X. Status quo and development trend of lost foam casting technology. China Foundry. 2014. Vol. 11, No. 4. P. 296–307.
86. Калюжний П. Б., Дьяченко М. М. Оцінка пробиваємості рідкоскляних сумішей як наповнювача литих модулів. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2025 : матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції. Київ, 2025. С. 295–297.
87. Jeon J. M., Lee S. J., Choe K. H., Huh J. S. Gas Pressure Effect on Sand Collapse in Kinetic Zone of Lost-Foam Casting. Advances in Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 2020. Article ID 5861017. 9 p. DOI: 10.1155/2020/5861017.
88. Клименко С. И., Маляр В. А. Закономерности формирования качества поверхности литых алюминиевых армированных конструкций при литье по газифицируемым моделям, наполненным графитовой фазой. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2016 : матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. конф., 30–31 травня 2016 р., м. Київ / за заг. ред. Р. В. Лютого, І. М. Гурії. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. С. 75–76. URL: [https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/03/conferenziya\\_2016.pdf](https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/03/conferenziya_2016.pdf) (дата звернення: 20.02.2026).
89. Дорошенко В. С., Шинський В. О. Приклади розрахунків техніко-економічних показників процесів лиття по разовим моделям. Процеси лиття. 2015. № 6.

90. Інноваційний розвиток промисловості як складова структурної трансформації економіки України : аналіт. доп. / О. В. Собкевич, А. І. Сухоруков, А. В. Шевченко [та ін.] ; за ред. Я. А. Жаліла. Київ : НІСД, 2014. 152 с. (Серія «Економіка», вип. 15).

91. Франчук Г. М., Запорожець О. І., Архіпова Г. І. Урбоекологія і техноекологія : підручник. Київ : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2011. 496 с.

92. Енергетика: минуле, сучасне, майбутнє : у 5 кн. Кн. 5 : Енергозбереження та відновлювана енергетика. URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5> (дата звернення: 10.04.2026).

93. Zero Pollution Action Plan. European Commission : website. URL: [https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_en) (дата звернення: 10.04.2026).

94. Шалевська І. А. Комплекс технологічних процесів екологічно безпечного виробництва виливків з прогнозованими функціональними властивостями за моделями, що газифікуються : дис. ... докт. техн. наук : 05.16.04. Київ, 2020. 416 с.

95. Збірник показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин в атмосферне повітря різними виробництвами. Т. 1. Донецьк : УкрНТЕК, 2004.

96. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» : затв. наказом МОЗ України від 08.04.2014 № 248.

97. Шинский О. И. Газогидродинамика и технологии литья железоуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям : дис. ... докт. техн. наук : 05.16.04. Киев, 1997. 473 с.

98. Шалевська І. А., Дьяченко М. М. Зменшення викидів шкідливих речовин при виготовленні литих конструкцій із неметалевим наповнювачем. Процеси лиття. 2026. № 2 (164). С. 31–38. DOI: 10.15407/plit2026.02.031.

## ДОДАТОК А



**Акт  
промислової перевірки результатів досліджень**

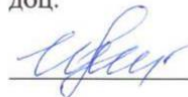
Співробітниками ПП «ВІДКАСТ» та Фізико-технологічного інституту НАН України було проведено у промислових умовах перевірку технологічного процесу одержання легковагих композиційних виливків із залізовуглецевих сплавів з неметалевими наповнювачами з використанням лиття за моделями, що газифікуються.

При розробці технологічного процесу було використано методи комп'ютерного та математичного моделювання із застосуванням обчислювального експерименту для аналізу термочасових параметрів у різних зонах системи «виливок-наповнювач», що дало змогу одержати якісні виливки з неметалевими наповнювачами.

За розробленою технологією виготовлено дослідні виливки, визначено їх властивості та товщину перехідного шару на межі «метал-наповнювач».

В результаті перевірки підтверджено ефективність процесу лиття за армованими моделями, що газифікуються, для виробництва литих композиційних виробів з керамічними наповнювачами та підвищеними експлуатаційними властивостями, що визначає доцільність впровадження таких технологій на підприємствах різних галузей.

ФТІМС НАН України  
Заст. директора з наук. роботи, д.т.н.,  
доц.

 Інна ШАЛЕВСЬКА

ПП «ВІДКАСТ»  
Начальник виробництва

 Сергій КІРІЛЛОВ

Аспірант

 Максим ДЬЯЧЕНКО