

М.М. Дьяченко, аспірант, e-mail: maximail@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0002-4957-9407>**І.В. Корнієць**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., заст. зав. відділу, e-mail: ivkorniets@gmail.com,<https://orcid.org/0000-0002-1803-9283>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України (Київ, Україна)

Дослідження процесів формування перехідного шару на межі сірий чавун–інтегрований неметалевий наповнювач при одержанні легковагових виливків

Одним із перспективних шляхів створення надійних та легких конструкцій із заданими експлуатаційними властивостями є використання литих легковагових композиційних виливків з інтегрованими керамічними наповнювачами. Ключовим фактором, що визначає якість таких виливків, є міцність зв'язку перехідного шару на межі розділу метал–кераміка. Метою роботи було дослідження фізико-хімічних процесів формування перехідного шару між розплавом сірого чавуну СЧ200 та двома типами інтегрованих керамічних наповнювачів (рідкоскляною сумішшю та керамзитом) при виготовленні виливків методом лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ). У роботі проведено аналіз теплових режимів і можливих хімічних реакцій. Теоретично проаналізовано термодинамічну ймовірність утворення силікатів (феросилікату, родоніту) та капілярні явища. Для моделювання використана математична модель теплопереносу, реалізована в спеціалізованому програмному комплексі, розробленому у ФТІМС НАН України. Експериментально виготовлено порожнисті виливки (сегменти модулів) з інтегрованими наповнювачами за технологією ЛГМ. Структуру досліджували методами оптичної мікроскопії. Результати моделювання виявили відмінності в теплових режимах та динаміці формування виливків для двох типів наповнювачів. Для системи з рідкоскляною сумішшю (РСС) формувалася значний градієнт температури, що свідчить про активне поглинання тепла та сприяло механізму глибокого капілярного просочення. Експеримент підтвердив формування вираженої зони механічного зчеплення глибиною 0,5–1,5 мм, що супроводжувалося хімічною взаємодією. На противагу, для системи з керамзитом спостерігався швидкий і рівномірний прогрів наповнювача за рахунок конвекції, що обумовило механізм поверхневої фізико-хімічної взаємодії та утворення тонкого (0,1–0,3 мм) щільного шару. На основі отриманих даних встановлено, що температура заливання 1430 °С забезпечує формування перехідного шару для обох типів наповнювачів. У статті порівняно механізми формування перехідного шару для двох теплофізично різних наповнювачів в умовах технології ЛГМ. Показано зв'язок між прогнозованими тепловими полями та товщиною перехідного шару, що формується. Отримані результати корисні для технологій виробництва легковагових литих деталей з локальним армуванням.

Ключові слова: легковагові композиційні виливки, інтегровані керамічні наповнювачі, перехідний шар, лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), моделювання, сірий чавун.

Вступ. Сучасне машинобудування орієнтоване на створення надійних та економічних конструкцій. Одним із важливих завдань є зниження маси деталей та вузлів без погіршення їх експлуатаційних характеристик.

Актуальним є використання легковагових виливків з інтегрованими керамічними наповнювачами, що дозволяють поєднати властивості металевої матриці (пластичність, опір ударному навантаженню) зі спеціальними властивостями неметалевих структур (висока твердість, зносостійкість, жорсткість, термостійкість) [1, 2]. Такі композиційні виливки дозволяють локально покращити експлуатаційні характеристики критично навантажених зон виробів, що працюють в умовах ударних навантажень, високотемпе-

ратурних проникаючих та механічних впливів [3–5]. Основним фактором, що визначає ефективність такого армування, є якість зв'язку на межі розділу фаз, яка забезпечує спільну роботу металу та кераміки без значного зниження несучої здатності конструкції.

Найбільш технологічним та економічно ефективним методом одержання складнопрофільних композиційних деталей є лиття, зокрема, за моделями, що газифікуються (ЛГМ). Цей метод надає можливість інтегрувати керамічні наповнювачі в ливарні полістиролові моделі, отримуючи готовий виріб однією ливарною технологією з мінімальною механічною обробкою [6, 7]. В якості наповнювача застосовують матеріал на основі кварцового піску, пов'язаний рідким склом (рідкоскляна суміш), яка здатна надавати виробу необхідні експлуатаційні ха-

рактеристики [8, 9], а також легкий наповнювач, як керамзит, що забезпечує значне зниження маси [10].

Формування структури та властивостей литих армованих композиційних виливків визначається комплексом факторів, які можна поділити на дві групи:

1. Фізико-хімічні фактори: властивості компонентів — металевої матриці (теплофізичні характеристики, хімічний склад) та керамічного наповнювача (тип, пористість, розмір частинок, теплопровідність, теплоємність, хімічний і фазовий склад), а також інтенсивність і характер їх взаємодії (змочування, хімічні реакції), що визначають формування перехідного шару.

2. Конструктивно-технологічні фактори: геометрія та розташування армуючих елементів у виливку, вибраний метод лиття та специфічні параметри технологічного процесу (температура заливки розплаву, швидкість заливки, час охолодження/тверднення, температура ливарної форми, властивості матеріалу форми (теплопровідність, газопроникність).

Ключову роль серед цих процесів відіграють теплові явища. Саме динаміка нагріву наповнювача та охолодження рідкої металевої матриці безпосередньо впливає на такі процеси: змочування поверхні, просочення розплаву у наповнювач, а також дифузію компонентів та хімічні реакції, що в сукупності сприяють утворенню перехідного шару. Прогнозування термочасових параметрів є необхідною задачею для передбачення структури та кінцевих властивостей литих композиційних виливків та оптимізації технологічних процесів створення виливків із наперед заданими характеристиками.

Таким чином, одержання якісних литих композиційних виливків на основі сірого чавуну з інтегрованими керамічними наповнювачами вимагає комплексного підходу, що поєднує прогнозування теплових процесів, які визначають формування перехідного шару, раціональний вибір матеріалів, оптимізацію технологічних параметрів лиття.

Метою роботи є дослідження фізико-хімічних процесів при формуванні перехідного шару між розплавом сірого чавуну та наповнювачами (рідкоскляна суміш та керамзит) під час одержання композиційних виливків; проведення оцінки теплового стану виливка при зміні неметалевої армуючої фази, дифузії компонентів (Fe, Mn, Si) через межу розділу фаз та можливої хімічної взаємодії з утворенням нових сполук (силікатів), що в сукупності визначають структуру та міцність композиційного виливка.

2. Матеріали та методика дослідження. Для досягнення поставленої мети було застосовано комп'ютерне та математичне моделювання та проведено експерименти на рідкому металі. Основними завданнями були:

1. Аналіз термочасових параметрів у різних зонах системи «виливок-наповнювач» для двох типів армуючих наповнювачів (рідкоскляна суміш, керамзит) шляхом комп'ютерного та математичного моделювання із застосуванням обчислювального експерименту.

2. Експериментальне вивчення формуван-

ня перехідного шару та його характеристик (товщина, структура) при виготовленні порожнистих композиційних виливків (на прикладі сегмента модуля) литтям за методом ЛГМ.

3. Дослідження макро- та мікроструктури перехідного шару, що формується між металевою матрицею та наповнювачем.

2.1. Об'єкти дослідження, матеріали та теоретичні передумови. Дослідження проводили на моделі порожнистого сегмента модуля, який одержують в піщано-глинистій формі (рис. 1). Вибір такої конфігурації виливка обумовлений завданням зниження маси при збереженні несучої здатності, що досягається за рахунок інтеграції наповнювачів у критичних зонах. Для формування виливків за моделями, що газифікуються (ЛГМ), використовувалися пінополістиролові моделі з щільністю 25 кг/м³. В якості матеріалу металевої матриці було обрано чавун марки СЧ200 (за ДСТУ 8833:2019). Вибір обумовлений ливарними властивостями чавуну та його поширеністю у виробництві відповідальних литих деталей в машинобудуванні.

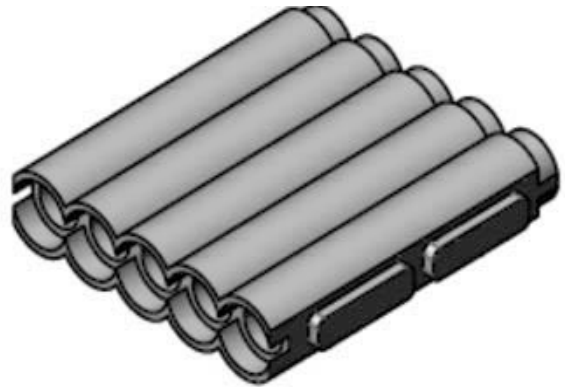


Рис. 1. Загальний вигляд сегмента модуля

Чавун СЧ200: межа міцності на розтяг — 200 МПа, твердість — 180–220 НВ. Хімічний склад: С 3,2–3,4%, Si 1,8–2,2%, Mn 0,5–0,8%, P ≤0,2%, S ≤0,12%, температура ліквідус — 1250 °С, температура солідус — 1175 °С, теплота фазового переходу — 260 Дж/кг, теплопровідність — 55,7 Вт/(м·К), питома теплоємність — 457 Дж/(кг·К), густина — 7200 кг/м³.

Досліджувалися два типи інтегрованих структур (наповнювачів):

1. **Рідкоскляна суміш (РСС)** — композиція на основі кварцового піску та рідкого скла. Після контакту з розплавом ця суміш зазнає структурних та хімічних перетворень з утворенням щільного силікатного шару, що дозволяє класифікувати її в готовому композиційному виробі як керамічну фазу. До складу РСС входив кварцовий пісок (група 2К3О3025 за ГОСТ 2138-91) з розміром зерна 0,16–0,20 мм, та рідке скло (силікат натрію) марки Б з силікатним модулем 2,9 (за ГОСТ 13078-81) у кількості 6 % від маси піску. Властивості суміші: густина — 2700 кг/м³, теплопровідність — 2,58 Вт/(м·К), теплоємність — 1170–2008 Дж/(кг·К).

2. **Керамзит** — керамзитовий гравій фракції 5–10 мм марки за щільністю М600 (насипна густина — 600–670 кг/м³), теплоємність — 840–920 Дж/(кг·К). Матеріал характеризується високою пористістю та низькою теплопровідністю (0,15 Вт/(м·К)).

Розрахунки проводили для центрального перерізу виливка. Схему області дослідження та розташування контрольних точок, у яких аналізувалися

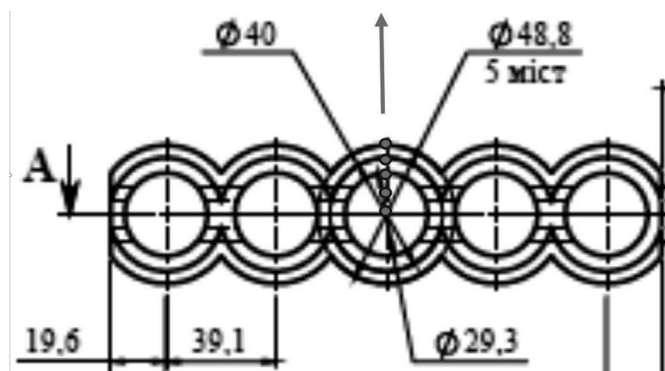
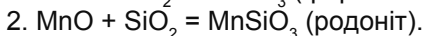
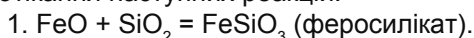


Рис. 2. Схема розрахункової області (центрального перерізу виливка) з позначенням контрольних точок: 1 — центр наповнювача; 2 — 1/2 радіуса неметалевої фази (наповнювача); 3 — межа розділу фаз «метал-наповнювач»; 4 — середина стінки виливка (1/2 товщини); 5 — зовнішня поверхня виливка (межа з ливарною формою)

термочасові параметри, представлено на рис. 2.

2.1.1. Теоретичний аналіз можливих фізико-хімічних процесів. Для прогнозування формування перехідного шару було проведено теоретичний аналіз можливих реакцій.

Термодинамічний аналіз реакцій. Для оцінки ймовірності протікання хімічних реакцій між компонентами розплаву та наповнювачем (SiO₂) було розраховано стандартну зміну енергії Гіббса (ΔG°) для реакцій утворення силікатів, використовуючи термодинамічні дані з довідника [11]. Початкова температура розплаву, що надходить у форму, становила 1430 °С (1703 К). Аналізували можливість протікання наступних реакцій:



Розрахунок ΔG° 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 ΔG_f для необхідних сполук при 1703 К, отримані шляхом інтерполяції даних [11], наведені в

Таблиця 1

Значення ΔG_f для хімічних сполук при 1430 °С (1703 К)

Хімічна сполука	ΔG_f при 1430 °С (1703 К), кДж/моль
FeO	~ -163,9
MnO	~ -257,2
SiO ₂	~ -610,2
FeSiO ₃	~ -834,5
MnSiO ₃	~ -1113,0

табл. 1.

Результати розрахунку ΔG° :

утворення FeSiO₃: $\Delta G^\circ \sim -834,5 - (-163,9 - 610,2) \sim -60,4$ кДж/моль,

MnSiO₃: $\Delta G^\circ \sim -1113,0 - (-257,2 - 610,2) \sim -245,6$ кДж/моль.

Обидві розраховані величини ΔG° мають від'ємні значення, що свідчить про термодинамічну можливість протікання даних реакцій за даних умов. При цьому реакція утворення родоніту (MnSiO₃) характеризується значно більшим від'ємним значенням ΔG° , що вказує на її вищу ймовірність та стабільність сполуки порівняно з феросилікатом.

Оскільки в чавуні СЧ200 є достатня кількість заліза та марганцю, а наповнювач багатий на SiO₂, створюються сприятливі умови для протікання реакцій утворення силікатів. Таким чином, проведений аналіз підтверджує можливість утворення силікатних сполук (FeSiO₃ та MnSiO₃) на межі розділу фаз «чавун-наповнювач», що має сприяти зміцненню перехідного шару.

Аналіз капілярних явищ. Глибина проникнення розплаву в пористу структуру наповнювача (особливо РСС) оцінювалася за модифікованим рівнянням Юнга-Лапласа, що враховує гравітацію:

$$h = H - (2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta) / (\rho \cdot g \cdot r),$$

де h — глибина проникнення; H — загальна висота капіляра; σ — поверхневий натяг розплаву; θ — кут змочування між розплавом і наповнювачем; ρ — щільність розплаву; g — прискорення вільного падіння; r — ефективний радіус пор.

Для системи «чавун-SiO₂» на основі хімічного складу розплаву (наявність С, Si) очікується менший кут змочування ($\theta < 90^\circ$) порівняно зі «сталь-SiO₂», що сприятиме кращому просоченню та формуванню більш міцного механічного зчеплення. Для керамзиту, з його великим радіусом пор, капілярний ефект менш виражений, і переважатимуть умови поверхневого (обмеженого глибиною) змочування, коли розплав контактує лише з зовнішньою поверхнею гранул.

Цей теоретичний базис дозволив сформулювати гіпотези щодо механізмів формування перехідного шару, які були перевірені подальшим моделюванням та експериментом.

2.2. Методика математичного моделювання теплових процесів. Для прогнозування термочасових параметрів під час формування композиційних виливків було використано програмний комплекс, розроблений у ФТІМС НАН України. Математична модель базується на підходах, розроблених для моделювання процесів формування литих композиційних виливків, дані про які зазначені в посиланнях [12, 13].

2.2.1. Фізико-математична основа моделі. Основу моделі складає узагальнене рівняння теплопровідності для багатокомпонентного середовища з урахуванням виділення прихованої теплоти кристалізації, яке можна записати у наступній формі:

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = \text{div}(\lambda_i \nabla T), \quad (1)$$

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

2.2.2. 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:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} I_{\Gamma} = \alpha_k (T - T_{\text{ср}}),$$

де α_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 —

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} I_{\Gamma} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} I_{\Gamma},$$

стрибок температури, пропорційний тепловому потоку —

$$T_1 - T_2 = R_c \cdot \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} I_{\Gamma} \right),$$

де R_c — контактний термічний опір, що враховує мікрошорсткість, наявність оксидних плівок або прошарків зв'язуючого; 1 — метал; 2 — армуюча фаза.

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

Для вирішення сформульованої задачі було використано чисельний метод кінцевих різниць.

2.2.3. Параметри розрахунку та перевірка адекватності моделі. Моделювання включало два послідовних етапи, що відповідають реальному технологічному процесу:

1. Моделювання заповнення форми: процес руху розплаву та заповнення форми моделювався з урахуванням руху вільної поверхні. Час заповнення був заданий рівним 8 секунд, що відповідає реальним швидкостям заливання.

2. Моделювання охолодження та тверднення: оцінку теплового стану досліджуваного виливка при зміні неметалевої армуючої фази (теплообмін, конвекція, виділення прихованої теплоти кристалізації і т. ін.) продовжували до затвердіння металевої матриці, тобто до досягнення температури солідусу чавуну (1175 °C). Такий часовий інтервал

моделювання охоплює основні етапи формування виливка, зокрема процес просочення наповнювача розплавом та формування перехідного шару на межі розділу фаз, що визначає міцність зчеплення в готовому композиційному виливку.

Для аналізу результатів моделювання були обрані контрольні точки, розташовані в характерних зонах виливка, як зазначено в табл. 2.

Таблиця 2

Контрольні точки та місце їх розташування в зонах виливка

Точки	Розташування точки	Зміст та мета контролю
1	Центр наповнювача	Аналіз динаміки прогріву наповнювача в часі
2	½ радіуса неметалевої фази (наповнювача)	Контроль проміжного прогріву наповнювача; оцінка внутрішнього температурного градієнта
3	Межа розділу фаз «метал–наповнювач»	Дослідження теплового контакту, формування перехідного шару
4	Середина стінки виливка (½ товщини)	Контроль швидкості тверднення металевої матриці
5	Зовнішня поверхня виливка (межа з формою)	Аналіз інтенсивності охолодження

Перевірка адекватності математичної моделі проводилась відповідно до методології, прийнятої в попередніх дослідженнях авторського колективу з моделювання процесів формування литих композиційних виливків [12—14]. Вона оцінювалась шляхом порівняння розрахункових температурних кривих у контрольних точках з експериментальними даними, отриманими в цих роботах для аналогічних ливарних систем (метал–армуюча фаза). Як і в цитованих джерелах, основним критерієм точності була середня розбіжність між розрахунком та експериментом.

Середнє відхилення розрахункових температур від експериментальних даних не перевищувало 10 %, що знаходиться в межах прийнятної похибки для подібних теплофізичних задач [12, 14] і підтверджує адекватність обраної математичної моделі для якісного та кількісного дослідження теплових процесів при формуванні досліджуваних композиційних виливків.

2.3. Методика експериментального дослідження. Для перевірки результатів моделювання та вивчення структури перехідного шару було виготовлено експериментальні виливки за технологією ЛГМ.

2.3.1. Технологія виготовлення виливків. Експериментальні виливки у вигляді сегментів модулів з чавуну СЧ200 виготовлялися за технологією лиття за моделями, що газифікуються. Технологічний

процес включав наступні етапи:

1. Виготовлення модельного комплекту: моделі виливка та ливникової системи виготовлялися з полістиролу марки D833B. Готові пінополістиролові моделі мали щільність 25 кг/м³.

2. Виготовлення наповнювачів: внутрішні порожнини ливарної форми заповнювали наповнювачами: рідкоскляною сумішшю (РСС) або керамзитом гравієм фракції 5–10 мм.

3. Формування: модельний комплект встановлювали в опоку та формували в сирих піщано-глинистих сумішах.

4. Заливання: форму заливали розплавом чавуну марки СЧ200 з температурою 1430 °С.

5. Вибивка та очищення: після повного охолодження (понад 24 години) виливки вибивали з форм і очищали.

2.3.2. Мікроструктурний аналіз. Для дослідження структури виливка в характерних зонах контакту «метал–наповнювач» виготовлялись мікрошліфи. Підготовка зразків включала послідовне механічне шліфування, полірування алмазними пастами (до 1 мкм) та травлення для виявлення структури.

Дослідження проводилося з використанням оптичного мікроскопу МИМ-8М для проведення макрота мікроструктурного аналізу, вимірювання товщини перехідного шару.

3. Результати та обговорення

3.1. Кореляція результатів моделювання з мікроструктурою та вплив типу наповнювача. Результати комп'ютерного моделювання теплових процесів під час формування виливка з різними наповнювачами (рідкоскляна суміш, керамзит) наведено на рис. 3 та 4.

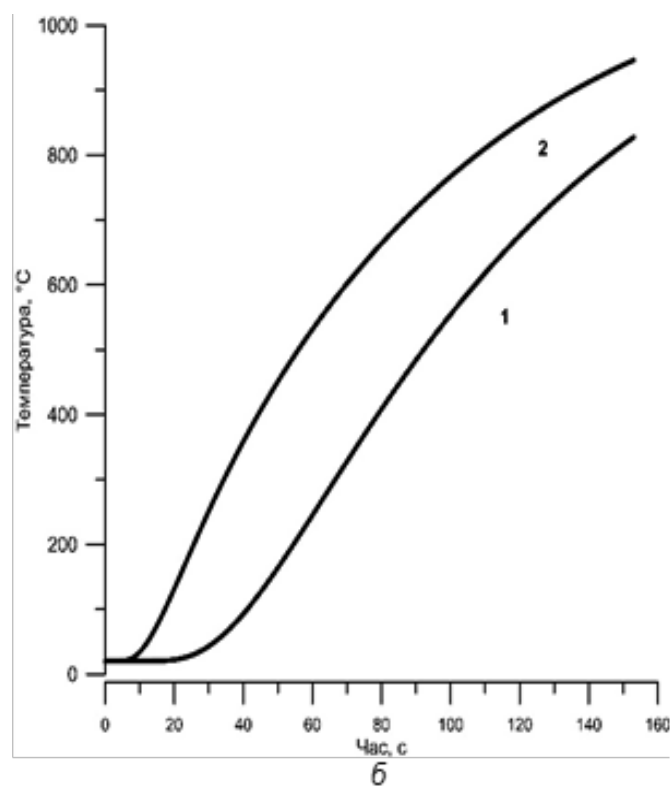
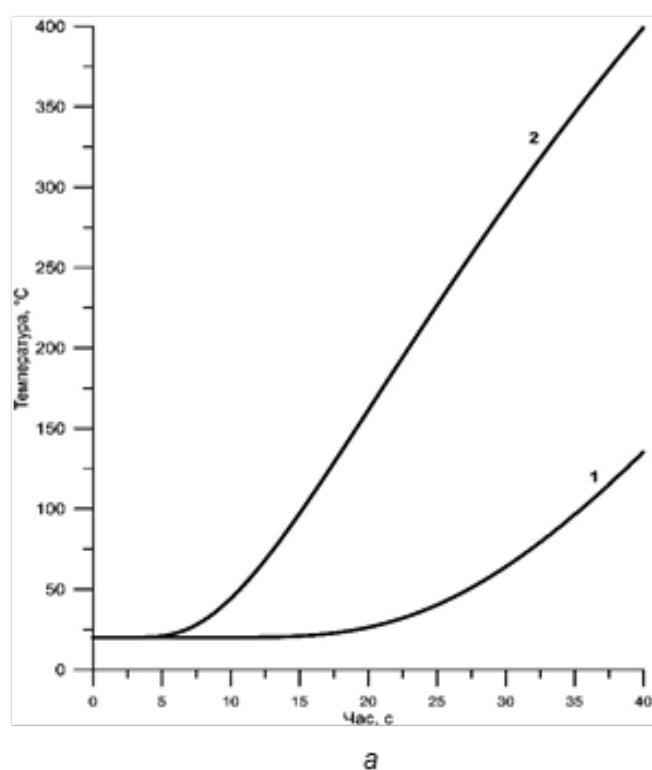


Рис. 3. Зміна температури в часі при формуванні виливка з наповнювачами: а — рідкоскляна суміш; б — керамзит: 1 — по центру неметалевої фази; 2 — 1/2 радіуса неметалевого наповнювача

На рис. 3 представлено зміну температури в часі у двох характерних точках всередині наповнювача: крива 1 — температура в центрі неметалевої фази; крива 2 — температура на відстані 1/2 радіуса неметалевої фази від його центру.

Аналіз цих кривих дозволив оцінити динаміку прогріву наповнювача. Для рідкоскляної суміші (РСС) спостерігається повільний прогрів серцевини наповнювача (рис. 3а, крива 1) за рахунок його високої теплопровідності. Це пояснюється тим, що наповнювач активно поглинає тепло від металевої матриці. Повне тверднення виливка відбувається за 40 секунд. В цей момент центр наповнювача прогрівається до температури ~ 125 °С, температура на відстані 1/2 радіуса досягає близько 400 °С

(рис. 3а, крива 2). При використанні наповнювача керамзит (рис. 3б) температура в його центрі зростає у процесі заповнення форми розплавом завдяки його течії через порожнини між гранулами керамзиту. Тверднення виливка відбувається за 160 секунд, температура в контрольних точках 1 та 2 досягає ~ 800 °С та 950 °С, відповідно. Таким чином, градієнт температур в наповнювачі в момент твердіння виливка (центр — 1/2 радіуса) складає ~ 275 °С для наповнювача рідкоскляна суміш та ~ 150 °С для наповнювача керамзит.

На рис. 4 показано розподіл температури вздовж радіуса виливка в часі: крива 1 — температура на межі розділу «метал–наповнювач»; крива 2 — температура в серцевині стінки виливка (1/2 товщини);

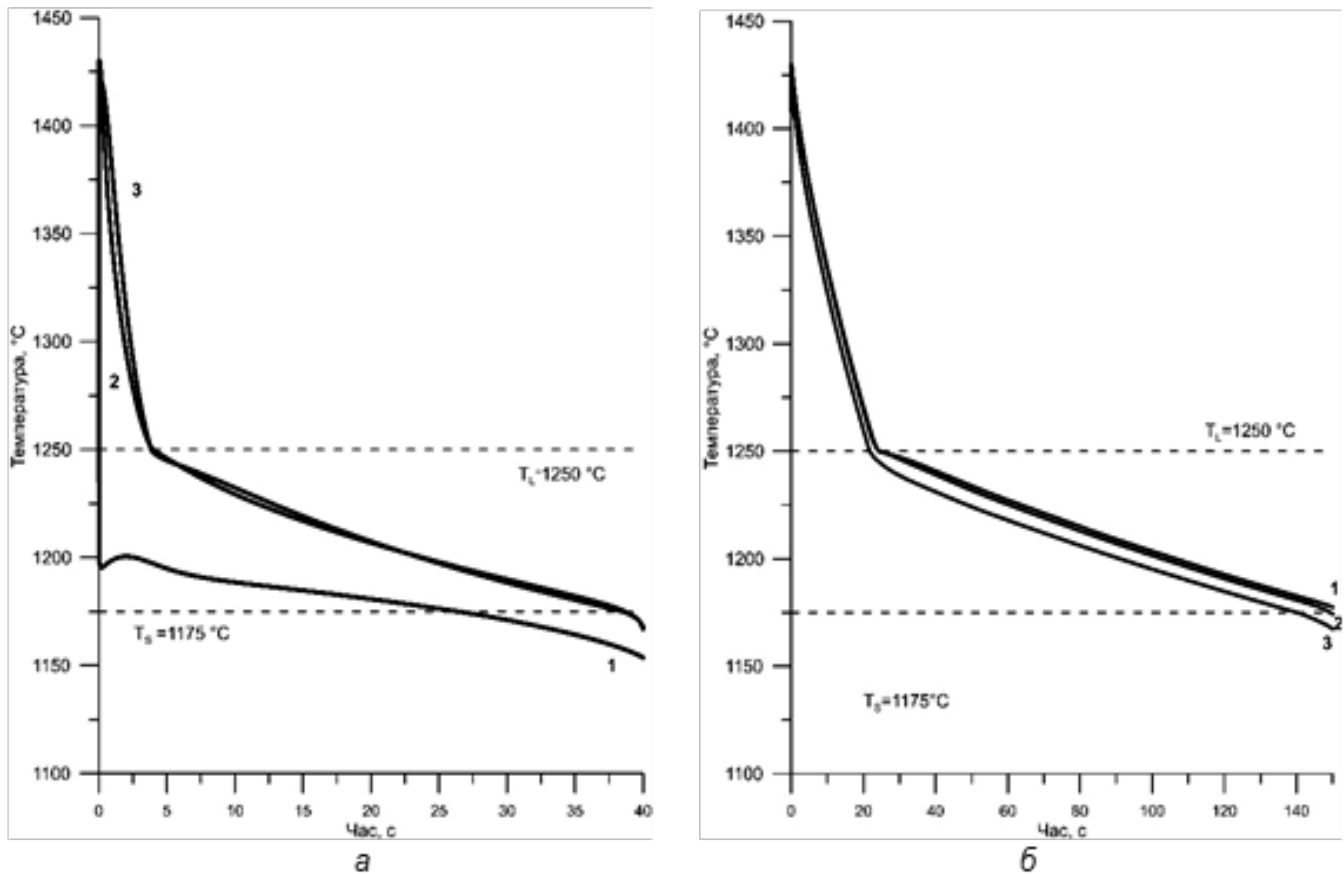


Рис. 4. Зміна температури при формуванні виливка вздовж радіуса для різних неметалевих фаз: а — рідкоскляна суміш; б — керамзит: 1 — на межі з наповнювачем; 2 — $\frac{1}{2}$ товщини виливка; 3 — на межі з формою

крива 3 — температура на зовнішній поверхні виливка (межа з ливарною формою). Таке представлення дає змогу оцінити загальний тепловий стан системи та градієнти, що виникають між різними її зонами.

Як видно, на межі метал–рідкоскляна суміш (рис. 4а, кр. 1) має місце різке зниження температури металу в перші моменти часу до температури двофазного стану ($\sim 1190^\circ\text{C}$), з формуванням миттєвого градієнта до $\sim 150^\circ\text{C}$, що підтверджує роль РСС як теплоакумулятора. Вже через 25 секунд метал в цій області досягає температури солідус. Температури в центрі виливка та на границі з формою (рис. 4а, кр. 2, 3) досягають температури ліквідус металу через 5 секунд, подальше формування виливка до його твердіння (40 с) відбувається з незначним градієнтом температур у цих областях.

Формування виливка з наповнювачем керамзит (рис. 4б) відбувається за іншою схемою. Маємо швидкий прогрів неметалевої фази і подальше направлене твердіння виливка (~ 140 с) за рахунок теплопроводу в форму. Градієнт температур у виливку складає $\sim 5\text{--}10^\circ\text{C}$.

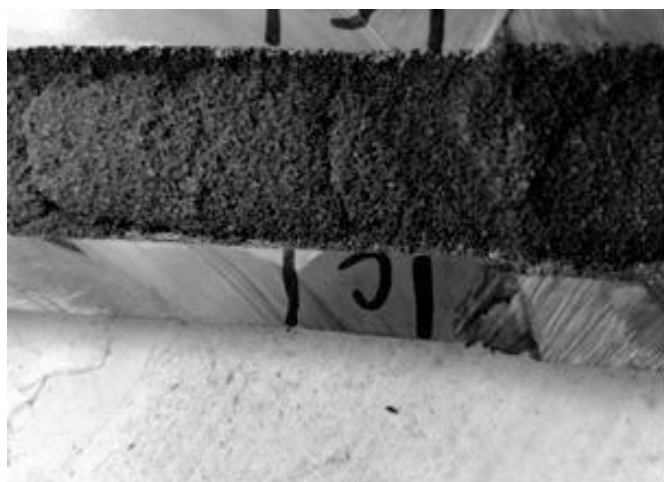
Прогнозовані моделюванням теплові режими безпосередньо визначили структуру перехідного шару. Експеримент підтвердив формування вираженої зони механічного зчеплення глибиною $0,5\text{--}1,5$ мм для системи з РСС (рис. 5а), що пояснюється глибоким капілярним просоченням розплаву в пористу структуру під дією гідростатичного та капілярного тиску, що описується моделлю Юнга-Лапласа [15, 16].

Мікроструктурний аналіз (рис. 6а) підтвердив формування щільного прошарку на межі розділу фаз «чавун СЧ200–рідкоскляна суміш», що свідчить не лише про механічне зчеплення, але й про фізико-хімічну взаємодію з можливим утворенням силікатних фаз (FeSiO_3 , MnSiO_3), що узгоджуються з принципом утворення легкоплавких силікатних фаз [11, 17, 18].

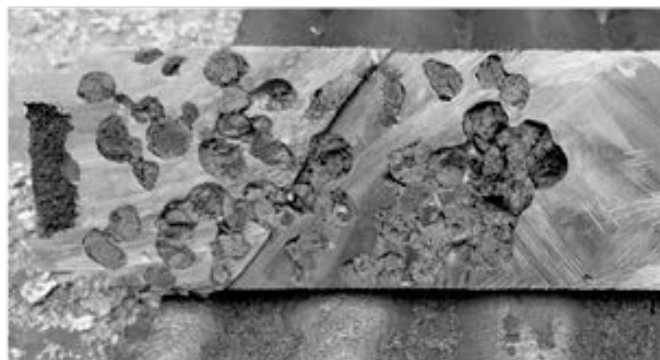
В системі з РСС, просочення та протікання фізико-хімічних процесів на межі розділу [9, 19], відбувалося за температури заливання — 1430°C , яка є достатньою для високої рідкоплинності чавуну.

Для системи з керамзитом швидкий і рівномірний прогрів, передбачений моделюванням (рис. 3б, 4б), призвів до іншого механізму — поверхневої фізико-хімічної взаємодії. Мікроструктура (рис. 6б) показує наявність значно тоншого ($0,1\text{--}0,3$ мм), але щільного шару взаємодії, утвореного внаслідок часткового оплавлення поверхні гранул керамзиту. Відсутність різкого теплового бар'єру при температурі заливання — 1430°C , дозволяє отримати якісне зв'язування в системі без руйнівного перегріву наповнювача [10].

Отримані дані показують зв'язок між теплофізичними властивостями наповнювача і тепловими режимами, що прогножуються моделюванням, та структурою перехідного шару, що формується. Глибина проникнення ($\sim 0,5\text{--}1,5$ мм) у випадку РСС забезпечує міцне механічне зчеплення, тоді як тонкий шар взаємодії ($\sim 0,1\text{--}0,3$ мм) для керамзиту забезпечує якісне фізико-хімічне зв'язування при зниженій масі виливка.



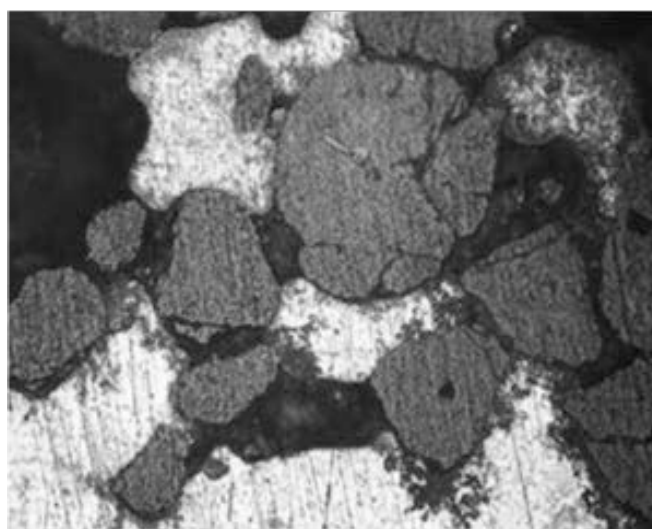
а



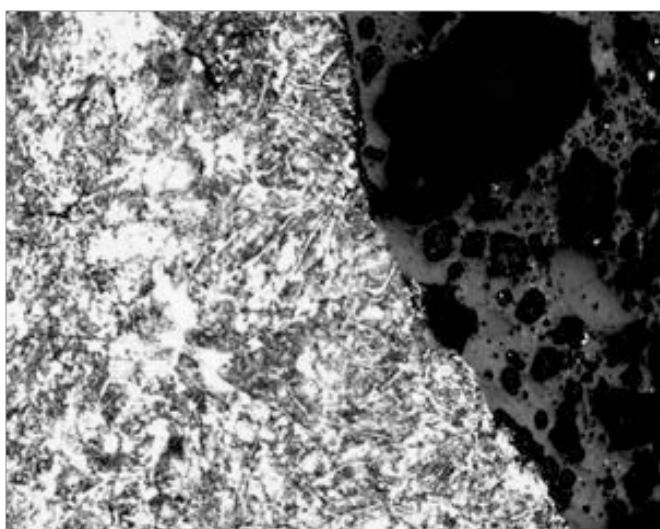
б

Рис. 5.

Макроструктура чавунного зразка з РСС (а) та керамзитом (б)



а



б

Рис. 6.

Мікроструктура чавунного зразка з РСС (а) та керамзитом (б)

3.2. Обговорення результатів. Одержані результати узгоджуються з літературними даними щодо важливого впливу теплових режимів [11] та фізико-хімічної взаємодії [17, 18] у формуванні якісного з'єднання на межі сплав–наповнювач. Зокрема, важливість утворення силікатних фаз для зчеплення підтверджується дослідженнями інших авторів [20–23]. Легкоплавкі силікати, що утворюються внаслідок реакцій оксидів заліза та марганцю з SiO_2 , після затвердіння виконують роль з'єднувальної фази, міцно зв'язуючи зерна кварцового наповнювача з металевою матрицею та формуючи суцільний шар матеріалу. Використання рідкоскляної суміші (РСС), де рідке скло виступає як в'язуча речовина, стійка до високих температур, дозволило реалізувати такий ефективний механізм хімічного армування.

Утворення силікатних фаз — феросиліту (FeSiO_3) та родоніту (MnSiO_3) на межі розділу є важливим фактором зміцнення перехідного шару. Ці кристалічні сполуки характеризуються високою твердістю та щільною структурою [24, 25], що забезпечує ефективне армування межі розділу «метал–кераміка».

Висновки

Запропоновано підхід щодо створення легковарових литих виливків із сірого чавуну СЧ200 шляхом інтеграції у порожнистий виливок неметалевих наповнювачів (рідкоскляної суміші та керамзиту) під час реалізації процесу лиття за моделями, що газифікуються.

У результаті дослідження фізико-хімічних процесів при формуванні перехідного шару між розплавом та наповнювачами, вивчення теплових полів (термочасових залежностей) при затвердінні сегмента модуля порожнистого виливка і порівняння процесів формування цього шару для різних наповнювачів, як з використанням комп'ютерного та математичного моделювання, так і натурального експерименту встановлено умови формування перехідного шару:

— для РСС — механізм глибокого капілярного просочення (~0,5–1,5 мм) під впливом механіко-хімічних факторів. Міцність з'єднання зростає за рахунок поєднання механічного зчеплення та хімічної взаємодії з утворенням силікатів FeSiO_3 та MnSiO_3 ;

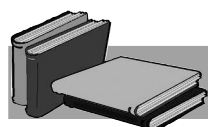
— для керамзиту — механізм поверхневої взаємодії з утворенням тонкого шару ($\sim 0,1\text{--}0,3$ мм), внаслідок фізико-хімічної взаємодії.

Встановлена температура заливання 1430°C забезпечує для систем з рідкоскляною сумішшю (РСС) глибоке капілярне просочення та формування перехідного шару, а для систем з керамзиту — поверхневу взаємодію без руйнівного перегріву.

Методом комп'ютерного та математичного моделювання встановлено відмінності прогріву наповнювачів і їх теплового контакту на межі розділу фаз: для системи з РСС — значний градієнт температури (на початковій стадії заливання — до $\sim 150^\circ\text{C}$), що свідчить про активне поглинання тепла наповнювачем, для систем з керамзитом — швидке вирівнювання температури за рахунок інтенсивної конвекції. Ці закономірності підтверджені експериментально.

Отримані результати підтверджують перспективність використання запропонованого підходу для створення легковагових виливків з інтегрованими керамічними наповнювачами. Використання рідкоскляної суміші дозволяє сформувати міцне зчеплення за рахунок глибокого капілярного проникнення, що є оптимальним для деталей, що працюють в умовах механічних та високотемпературних проникаючих впливів. У свою чергу, застосування керамзиту, як структури з низькою щільністю, забезпечує формування щільного тонкого шару взаємодії, що дозволяє значно знизити масу виробу.

На прикладі досліджених систем підтверджено ефективність технології ЛГМ з локальним армуванням для виробництва легковагових литих композиційних виробів з різними типами інтегрованих керамічних наповнювачів і зонами з підвищеними експлуатаційними властивостями.

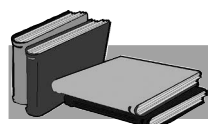


ЛІТЕРАТУРА

1. Pooja K., Tarannum N., Chaudhary P. Metal matrix composites: revolutionary materials for shaping the future. *Discover Materials*. 2025. Vol. 5. Art. No. 35. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00226-6>
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. Iss. 1—3. P. 58—67. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00639-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00639-7)
3. Oladijo O.P., Awe S.A., Akinlabi E.T., Phiri R.R., Collious L.L., Phuti R.E. High-Temperature Properties of Metal Matrix Composites. *Encyclopedia of Materials: Composites*. 2021. Vol. 1. P. 360—374. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00096-3>
4. Deschamps I.S., Avila D. dos S., Piazeria E.V., Dudley Cruz R.C., Aguilar C., Klein A.N. Design of In Situ Metal Matrix Composites Produced by Powder Metallurgy—A Critical Review. *Metals*. 2022. Vol. 12. Iss. 12. 2073. <https://doi.org/10.3390/met12122073>
5. Yunanda W.W., Gunadi G.I., Kasim K. Metal as a Ballistic-Resistant Lightweight Protective Material in the Military Field. *International Journal of Social Science Research and Review*. 2022. Vol. 5. No. 12. P. 287—296. <https://doi.org/10.47814/ijssrr.v5i12.808>
6. Olejnik E. Local composite reinforcements of WC/Fe-C type obtained in-situ via SHS synthesis in gray cast iron castings. *SSRN Electronic Journal*. 2024. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5177462>
7. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Волянська К.В. Композиційні отливки з регульованим поверхневим шаром. *Металл і лиття України*. 2016. № 4(275). С. 18—23.
8. Dulski A., Studnicki A., Szajnar J. Reinforcing cast iron with composite insert. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2017. Vol. 62. No. 1. P. 355—357. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0054>
9. Затуловський А.С., Щерецький В.А., Ивахненко М.О. Литіє биметалічні втулки з износоустійким композиційним шаром. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні (Праці Міжнародної науково-технічної конференції)*. 2017. № 2. С. 17—19. <https://doi.org/10.20535/2519-450x.2.2017.119173>
10. Orbulov I.N., Szlancsik A., Kemény A., Kincses D. Low-Cost Light-Weight Composite Metal Foams for Transportation Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022. Vol. 31. Iss. 9. P. 6954—6961. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06644-4>
11. Barin I. Thermochemical Data of Pure Substances. In 3 vol. Vol. 1. Ag – Kr / I. Barin; in collaboration with G. Platzki. 3rd ed. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft. 1995. Vol. 1. P. 1845. URL: <https://ru.scribd.com/document/414220058/Thermochemical-Data-of-Pure-Substances-BARIN-pdf> (дата звернення: 17.10.2025).
12. Тарасевич Н.И., Корнієць І.В., Затуловський А.С. Моделирование процесса формирования литых композиционных материалов. *Процеси лиття*. 1995. № 4. С. 40—49.
13. 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. <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.025>
14. Тарасевич М.І., Шинський О.Й., Шалевська І.А., Корнієць І.В., Гнилюк С.В., Дьяченко М.М. Вплив діаметра та об'ємної частки армуючих елементів на формування композиційних виливків. *Метал та лиття України*. 2025. Т. 33. № 2(341). С. 30—37. <https://doi.org/10.15407/steelcast2025.02.030>
15. Young T. An Essay on the Cohesion of Fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1805. 95. P. 65—87. <https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>
16. Laplace P-S. *Traité de mécanique céleste. Supplément au dixième livre*. Paris: Courcier; 1806.
17. Endo R., Mitsui K., Hashiyama S., Miyazaki L., Watanabe T., Ueda M., Hayashi M., Tanei H., Susa M. Potential Utilization of Iron Oxidation Reaction Heat for the Generation of SiO₂-FeO System Melts. *International Journal of Thermophysics*. 2024. Vol. 45. Iss. 44. P. 1—19. <https://doi.org/10.1007/s10765-024-03338-y>
18. O'Neill H.S.C. Quartz-fayalite-iron and quartz-fayalite-magnetite equilibria and the free energy of formation of fayalite (Fe₂SiO₄) and magnetite (Fe₃O₄). *American Mineralogist*. 1987. Vol. 72. No. 1—2. P. 67—75. URL: <https://scispace.com/pdf/quartz-fayalite-iron-and-quartz-fayalite-magnetite-1fisq3729f.pdf> (дата звернення: 17.10.2025).
19. Zhang, G.D., Chen R. Effect of the interfacial bonding strength on the mechanical properties of metal matrix composites. *Composite Interfaces*. 1993. Vol. 1. Iss. 4. P. 337—355. <https://doi.org/10.1163/156855493X00167>
20. Rasouli A., Kudyba A., Bruzda G., Safarian J., Tranell G. High-Temperature Reactive Wetting of Natural Quartz by Liquid Magnesium. *Materials*. 2024. Vol. 17. Iss. 6. Art. No. 1302. <https://doi.org/10.3390/ma17061302>
21. Wang Z., Peng B., Zhang L., Zhao Z., Liu D., Peng N., Wang D., He Y., Liang Y., Liu H. Study on Formation Mechanism of Fayalite (Fe₂SiO₄) by Solid State Reaction in Sintering Process. *JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2018. Vol. 70. P. 539—546. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2699-6>
22. Haneda M., Iijima J., Koike J. Growth behavior of self-formed barrier at Cu-Mn/SiO₂ interface at 250–450 °C. *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 90. Iss. 25. Art. No. 252107. <https://doi.org/10.1063/1.2750402>

23. Chen J., Gu M., Pan F. Reactive wetting of a metal/ceramic system. *Journal of Materials Research*. 2002. Vol. 17. No. 4. P. 911–917. <https://doi.org/10.1557/JMR.2002.0133>
24. Ferrosilite. Mineral Data Publishing. 2001. 1 p. URL: <https://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/ferrosilite.pdf> (дата звернення: 17.10.2025).
25. Rhodonite. Mineral Data Publishing. 2001. 1 p. URL: <https://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/rhodonite.pdf> (дата звернення: 17.10.2025).

Надійшла 19.11.2025



REFERENCES

1. Pooja, K., Tarannum, N., & Chaudhary, P. (2025). Metal matrix composites: revolutionary materials for shaping the future. *Discover Materials*, 5(35). <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00226-6>
2. Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., & Włosiński, W. (2000). The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1-3), 58-67. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00639-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00639-7)
3. Oladijo, O. P., Awe, S. A., Akinlabi, E. T., Phiri, R. R., Collieus, L. L., & Phuti, R. E. (2021). High-Temperature Properties of Metal Matrix Composites. *Encyclopedia of Materials: Composites*, 1, 360-374. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00096-3>
4. Deschamps, I. S., Avila, D. dos S., Piazero, E. V., Dudley Cruz, R. C., Aguilar, C., & Klein, A. N. (2022). Design of In Situ Metal Matrix Composites Produced by Powder Metallurgy—A Critical Review. *Metals*, 12(12), 2073. <https://doi.org/10.3390/met12122073>
5. Yunanda, W. W., Gunadi, G. I., & Kasim, K. (2022). Metal as a Ballistic-Resistant Lightweight Protective Material in the Military Field. *International Journal of Social Science Research and Review*, 5(12), 287-296. <https://doi.org/10.47814/ijssrr.v5i12.808>
6. Olejnik, E. (2024). Local composite reinforcements of WC/Fe-C type obtained in-situ via SHS synthesis in gray cast iron castings. *SSRN Electronic Journal*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5177462>
7. Yasiukov, V. V., Lysenko, T. V., & Volianska, K. V. (2016). Composite castings with a controlled surface layer. *Metal and Casting of Ukraine*, 4(275), 18-23 [in Russian].
8. Dulska, A., Studnicki, A., & Szajnar, J. (2017). Reinforcing cast iron with composite insert. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(1), 355-357. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0054>
9. Zatulovskiy, A. S., Scheretskiy, V. A., & Ivahnenko, M. O. (2017). Cast bimetallic bushings with wear-resistant composite layer. *New Materials and Technologies in Machinebuilding*, (2), 17-19. <https://doi.org/10.20535/2519-450x.2.2017.119173> [in Russian].
10. Orbulov, I. N., Szlancsik, A., Kemény, A., & Kincses, D. (2022). Low-Cost Light-Weight Composite Metal Foams for Transportation Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(9), 6954-6961. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06644-4>
11. Barin, I. (1995). Thermochemical Data of Pure Substances. In 3 vol. Vol. 1. Ag – Kr / I. Barin; in collaboration with G. Platzki. 3rd ed. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1, p. 1845. URL: <https://ru.scribd.com/document/414220058/Thermochemical-Data-of-Pure-Substances-BARIN-pdf>
12. Tarasevich, N. I., Korniyets, I. V., & Zatulovskiy, A. S. (1995). Modelirovanie protsessa formirovaniya lityih kompozitsionnyih materialov [Modeling the process of forming cast composite materials]. *Casting Processes*, (4), 40-49 [in Russian].
13. Tarasevich, M. I., Shinsky, O. Y., Shalevska, I. A., & Korniyets, I. V. (2023). Influence of the mass ratio of the reinforcing element and matrix alloy for forming heterogeneous casting. *Casting Processes*, 3(153), 25-33. <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.025> [in Ukrainian].
14. Tarasevich, M. I., Shynsky, O. Y., Shalevska, I. A., Korniyets, I. V., Gnyloskurenko, S. V., & Dyachenko, M. M. (2025). Influence of Diameter and Volume Fraction of Reinforcing Elements on the Formation of Composite Castings. *Metal and Casting of Ukraine*, 33(2(341)), 30-37. <https://doi.org/10.15407/steelcast2025.02.030> [in Ukrainian].
15. Young, T. (1805). An Essay on the Cohesion of Fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, 65-87. <https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>
16. Laplace, P-S. (1806). Traité de mécanique céleste. Supplément au dixième livre. [Treatise on Celestial Mechanics. Supplement to the Tenth Book]. Paris: Courcier [in French].
17. Endo, R., Mitsui, K., Hashiyama, S., Miyazaki, L., Watanabe, T., Ueda, M., Hayashi, M., Tanei, H., & Susa, M. (2024). Potential Utilization of Iron Oxidation Reaction Heat for the Generation of SiO₂-FeO System Melts. *International Journal of Thermophysics*, 45(44), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10765-024-03338-y>
18. O'Neill, H. S. C. (1987). Quartz-fayalite-iron and quartz-fayalite-magnetite equilibria and the free energy of formation of fayalite (Fe₂SiO₄) and magnetite (Fe₃O₄). *American Mineralogist*, 72(1-2), 67-75. URL: <https://scispace.com/pdf/quartz-fayalite-iron-and-quartz-fayalite-magnetite-1fisq3729f.pdf>

19. Zhang, G. D., & Chen, R. (1993). Effect of the interfacial bonding strength on the mechanical properties of metal matrix composites. *Composite Interfaces*, 1(4), 337-355. <https://doi.org/10.1163/156855493X00167>
20. Rasouli, A., Kudyba, A., Bruzda, G., Safarian, J., & Tranell, G. (2024). High-Temperature Reactive Wetting of Natural Quartz by Liquid Magnesium. *Materials*, 17(6), 1302. <https://doi.org/10.3390/ma17061302>
21. Wang, Z., Peng, B., Zhang, L., Zhao, Z., Liu, D., Peng, N., Wang, D., He, Y., Liang, Y., & Liu, H. (2018). Study on Formation Mechanism of Fayalite (Fe_2SiO_4) by Solid State Reaction in Sintering Process. *JOM: The journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 70, 539-546. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2699-6>
22. Haneda, M., Iijima, J., & Koike, J. (2007). Growth behavior of self-formed barrier at Cu-Mn/SiO₂ interface at 250–450 °C. *Applied Physics Letters*, 90(25), 252107. <https://doi.org/10.1063/1.2750402>
23. Chen, J., Gu, M., & Pan, F. (2002). Reactive wetting of a metal/ceramic system. *Journal of Materials Research*, 17(4), 911-917. <https://doi.org/10.1557/JMR.2002.0133>
24. Ferrosilite. Mineral Data Publishing. 2001. 1 p. URL: <https://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/ferrosilite.pdf>
25. Rhodonite. Mineral Data Publishing. 2001. 1 p. URL: <https://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/rhodonite.pdf>

Received 19.11.2025

Summary

M.M. Dyachenko, PhD student, e-mail: maximail@ukr.net,
<https://orcid.org/0009-0002-4957-9407>

I.V. Korniets, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Deputy Head of
Department, e-mail: ivkorniets@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-1803-9283>

*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy
of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

Investigation of the Processes of Transition Layer Formation at the Interface of Gray Cast Iron–Integrated Non-Metallic Filler in the Production of Lightweight Castings

One of the promising approaches for creating reliable and lightweight structures with specified operational properties is the use of lightweight composite castings with integrated ceramic fillers. The key factor determining the quality of such castings is the bond strength of the transition layer at the metal–ceramic interface. The aim of this work was to study the physico-chemical processes of transition layer formation between a melt of gray cast iron SCh200 and two types of integrated ceramic fillers (a liquid glass mixture and expanded clay) during the production of castings using the lost foam casting (LFC) method. The work involved an analysis of thermal regimes and possible chemical reactions. The thermodynamic probability of the formation of silicates (ferrosilite, rhodonite) and capillary phenomena were theoretically analyzed. For modeling, a mathematical heat transfer model implemented in a specialized software package developed at the PTIMA of the National Academy of Sciences of Ukraine was used. Hollow castings (module segments) with integrated fillers were experimentally produced using LFC technology. The structure was investigated using optical microscopy methods. The modeling results revealed differences in the thermal regimes and the dynamics of casting formation for the two filler types. For the system with the liquid glass mixture, a significant temperature gradient formed, indicating active heat absorption and promoting the mechanism of deep capillary impregnation. The experiment confirmed the formation of a pronounced mechanical bonding zone with a depth of 0.5–1.5 mm, with signs of additional chemical interaction. In contrast, for the system with expanded clay, a rapid and uniform heating of the filler due to convection was observed, which determined the mechanism of surface physicochemical interaction and the formation of a thin (0.1–0.3 mm) dense layer. Based on the obtained data, it was established that the pouring temperature of 1430 °C ensures the formation of the transition layer for both filler types. The article compares the mechanisms of transition layer formation for two thermophysically different fillers under the conditions of LFC technology. A relationship is shown between the predicted thermal fields and the thickness of the formed transition layer. The obtained results are useful for the production technologies of lightweight cast parts with local reinforcement.

Keywords

Lightweight composite castings, integrated ceramic structures, transition layer, lost-foam casting process (LFC), modeling, gray iron.