

М.І. Тарасевич, д-р техн. наук, ст. наук. співр., заст. директора, e-mail: nit@ptima.kiev.ua,
<https://orcid.org/0009-0007-6271-0146>

О.Й. Шинський, д-р техн. наук, проф., зав. відділу, e-mail: aluprt@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0001-6200-0709>

І.А. Шалевська, д-р техн. наук, доц., заст. директора, e-mail: innashalevska@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-8410-7045>

І.В. Корнієць, канд. техн. наук, ст. наук. співр., заст. зав. відділу, e-mail: ivk@ptima.kiev.ua,
<https://orcid.org/0000-0002-1803-9283>

С.В. Гнилокурченко, канд. техн. наук, ст. дослідник, зав. відділу, e-mail: slava.vgn@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-0201-7191>

М.М. Дьяченко, аспірант, e-mail: maximail@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0002-4957-9407>

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

Вплив діаметра та об'ємної частки армуючих елементів на формування композиційних виливків

Для сучасного машинобудування актуальними є композиційні матеріали, які забезпечують покращені властивості деталей. Роботу присвячено дослідженню впливу діаметра та об'ємної частки армувальних елементів у вигляді стрижнів на теплові процеси, які мають місце при кристалізації та формуванні структури литих сталевих композиційних матеріалів. Методами обчислювального експерименту та комп'ютерного моделювання було досліджено теплову взаємодію між матричним розплавом (сталь 35) та армуючими елементами (сталь 20), фазові перетворення при різних поєднаннях їх діаметрів (2–10 мм) та об'ємної частки (10–50 %), утворення та динаміку росту твердих кірок на межі розділу фаз «рідкий сплав — армувальний елемент», критичні параметри, що забезпечують оптимальне з'єднання матричного сплаву з армуючими елементами. У результаті роботи встановлені критичні співвідношення діаметра та об'ємної частки армуючих елементів (10–31,5 %), які впливають на якість зчеплення фаз та мікроструктуру матеріалу, розроблені регресійні моделі для прогнозування температурних режимів на поверхні армуючих елементів залежно від їх діаметра та об'ємної частки, визначені оптимальні технологічні параметри одержання композиційних виливків. При діаметрах армуючих елементів 2 мм та об'ємній їх частці 10–50 %, а також 5 мм та об'ємній частці до 30 %, відбувається повне розплавлення армуючої фази, що забезпечує гомогенізацію структури. Для стрижнів діаметром 6–10 мм визначено граничні об'ємні частки: для 7 мм — 21 %, для 9 мм — 16 %, при яких досягається оптимальне з'єднання фаз без утворення стійкої твердої кірки. Практична значимість одержаних результатів полягає у можливості точного контролю та оптимізації технологічних параметрів при одержанні якісних литих композитів з мінімальними дефектами.

Ключові слова: армований композиційний виливок, лиття, теплопередача, фазові перетворення, дифузійний зв'язок, регресійний аналіз, математичне моделювання.

Вступ. У сучасному машинобудуванні поряд із суцільними металевими матеріалами або сплавами використовуються композиційні матеріали, які можуть забезпечувати спеціальні властивості, такі як корозійну стійкість, жароміцність та жаростійкість. Ефективним методом одержання таких матеріалів є армування розплавів, яке забезпечує цілеспрямоване поліпшення механічних та експлуатаційних характеристик: міцності, зносостійкості, корозійної стійкості, термостійкості, жорсткості та інших.

Відомий клас литих армованих композиційних

матеріалів з металевою матрицею (Al, Ti, Cu, Mg, Fe) та армуючих стрижнів (металічних, керамічних, вуглецевих тощо). У таких матеріалах поєднуються властивості основного металу (пластичність, теплопровідність) та армуючих елементів (міцність, жорсткість та ін.).

Ці матеріали застосовуються у ключових галузях промисловості, таких як авіакосмічна, автомобілебудівна, оборонна та машинобудування [1]. У порівнянні з моносплавами механічні властивості у литих композиційних матеріалів значно вищі [2].

У сучасній промисловості застосовуються різні ливарні методи отримання армованих композиційних матеріалів, а саме — лиття з перемішуванням (вихровий метод) [3—4], лиття за технологією просочення (інфільтрації) [5—7], лиття під тиском [8] та інші.

Ці способи дозволяють одержувати композиційні матеріали з різною комбінацією матричних сплавів та армуючих елементів. В якості останніх можуть бути використані керамічні матеріали (карбід кремнію SiC, оксид алюмінію Al_2O_3 та ін.) [9], волокнисті елементи: (вуглець, бор) [10], макроармуючі елементи (безперервні проволоки, стрижні або нитки з розміром, істотно більшим, ніж при мікроармуванні) [11]. Стрижні розміщуються в матриці для посилення композиту в заданих напрямках, що дозволяє локально регулювати механічні властивості, такі як жорсткість та міцність. В таких композитах теплота розплаву витрачається на нагрівання армуючої фази, що сприяє більш швидкому охолодженню, а швидкість затвердіння збільшується пропорційно масі та об'ємній частці армуючої фази [12].

При виборі армуючих елементів важливо враховувати вимоги до механічних властивостей виробів, а також економічну доцільність їх застосування.

Для отримання оптимальних властивостей у таких композитах потрібно враховувати ряд ключових технологічних вимог, таких як: відсоток наповнення армуючими елементами, рівномірний їх розподіл в матричному металі, надійне зчеплення між матрицею та армуючим компонентом, відсутність хімічної взаємодії, що знижують механічні характеристики.

У попередній роботі було досліджено вплив масового співвідношення армуючої фази та матричного сплаву при фіксованій геометрії армуючого елемента (циліндр діаметром 10 мм висотою 200 мм) на формування гетерогенного виливка [13].

Результати показали, що масове співвідношення матричного сплаву та армуючих елементів є основним фактором, що визначає якість зчеплення фаз, мікроструктуру виливка, експлуатаційні характеристики кінцевого виробу. Оптимізація цього параметра співвідношення матриці та армуючих елементів (не більше 18—31,5 %) забезпечує максимальну ефективність технології лиття композиційних матеріалів.

Відомі дослідження щодо впливу варіативності геометрії (діаметра) та об'ємної частки армуючих елементів у виливку, теплової взаємодії між матрицею та армуючою фазою, прогнозування властивостей композиту [8—12].

Метою даної роботи є вибір параметрів армування для покращення технології лиття композитних матеріалів на основі сталей. Задачами досліджень були вивчення теплових процесів, які мають місце при введенні армувальних стрижнів у матричний розплав сталі.

Методика експерименту. В якості об'єкта дослідження в роботі було обрано циліндричний сталевий виливок (Сталь 35) діаметром 100 мм і висотою 200 мм, армований металевими елементами-стрижнями зі Сталі 20 діаметром від 2 мм до 10 мм,

висотою 200 мм. Виливок формувався в піщано-глинистій формі. Загальний вигляд виливка і область дослідження представлено на рис. 1.

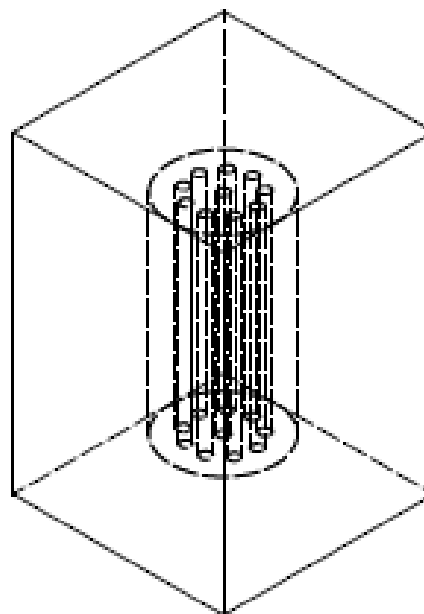


Рис. 1. Загальний вигляд і область дослідження армованого виливка у формі

Об'ємне співвідношення армуючих елементів до матричного сплаву змінювали від 10 % до 50 %. Температура сталі при заливанні становила 1600 °С, а армуючих елементів — 20 °С. Теплофізичні характеристики матеріалів, які використовувались при розрахунках, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики матеріалів

Характеристики \ Матеріал	Сталь 35 (випи- сок)	Сталь 20 (армую- чий елемент)
Густина, кг/м ³	7550	7600
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	699	695
Теплопровідність, Вт/(м·К)	28	32
Теплота фазового переходу, кДж/кг	261	267
Температура ліквідус, °С	1498	1510
Температура солідус, °С	1437	1480

Дослідження проводили для представницького об'єму армованого виливка — мінімальної частини об'єму гетерогенного тіла, багаторазовим повторенням якого можна реконструювати тіло в цілому. Причому, представницький об'єм вміщує ту ж частку армуючого елемента, що і весь виливок.

Для досліджуваного виливка в табл. 2 наведено значення шагу армування H (відстань між осями сусідніх армуючих елементів) залежно від об'ємної частки армуючих елементів V та їх діаметра d .

Шаг армування (H , мм), який відповідає об'ємній частці армуючих елементів (V , %) та їх діаметру (d , мм)

V , %	H , мм						
	$d = 2$ мм	$d = 5$ мм	$d = 6$ мм	$d = 7$ мм	$d = 8$ мм	$d = 9$ мм	$d = 10$ мм
10	5,6	14,0	16,8	19,61	22,4	25,216	28
15	4,57	11,43	13,72	16,0	18,28	20,58	22,8
20	3,962	9,91	11,88	13,8	15,85	17,83	19,8
25	3,544	8,86	10,6	12,4	14,18	15,9	17,72
30	3,236	8,09	9,7	11,3	12,94	14,56	16,2
35	2,995	7,49	8,98	10,48	11,98	13,47	14,98
40	2,8	7,0	8,4	9,8	11,2	12,6	14
45	2,64	6,6	7,92	9,24	10,56	11,88	13,2
50	2,505	6,26	7,52	8,77	10,02	11,27	12,5

Методом обчислювального експерименту проведено моделювання та оцінку теплового стану досліджуваного виливка при зміні об'ємного співвідношення основного металу та армуючих елементів для різних діаметрів [14].

Були враховані умови на внутрішніх і зовнішніх границях, геометрія розрахункової області і теплофізичні характеристики матеріалів. В модель було закладено зміни теплового стану у неоднорідному середовищі з урахуванням фазових перетворень при неідеальному тепловому контакті двох середовищ.

Граничні умови в загальному випадку брались з урахуванням теплообміну за рахунок одночасної радіації і конвекції. Така модель забезпечує надійне прогнозування температурних полів та часу формування композиту при литті з точністю до 10 %, що підтверджено експериментально.

Розрахунки проводили для центрального перерізу виливка (рис. 2).

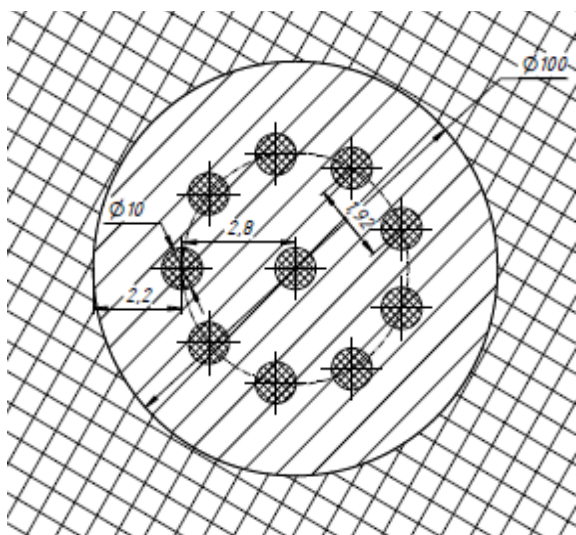


Рис. 2. Схема до розрахунків (діаметр армуючого елемента — 2 мм, V — 40 %).

Результати. У результаті аналізу теплової взаємодії перегрітого рідкого металу з армуючим елементом в процесі теплопередачі залежно від

об'ємної частки армуючої фази та її діаметра встановлено можливі варіанти теплової рівноваги:

— армуючий елемент повністю розплавляється в матричному металі;

— на поверхні армуючого елемента утворюється тверда кірка матричного металу, яка під дією теплоти перегріву рідкого металу розплавляється та після розігріву армуючого елемента має місце послідовне збільшення твердої фази;

— на поверхні армуючого елемента утворюється стійка тверда кірка, і твердіння йде послідовно до моменту зустрічі направлених фронтів.

На рис. 3 показано зміну температури в центрі армуючого елемента (1) та в матричному розплаві між армуючими елементами (2) залежно від їх об'ємної частки при різних діаметрах вставки. Видно, що

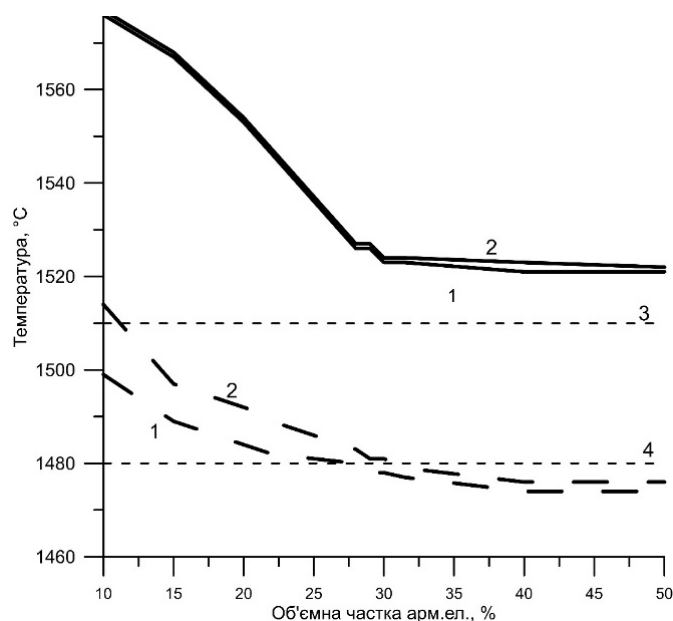


Рис. 3. Зміна температури, що встановилась в центрі армуючого елемента (1) та в матричному розплаві між армуючими елементами (2) залежно від їх об'ємної частки. 3 — температура ліквідусу армуючого елемента, 4 — температура солідусу армуючого елемента. Діаметр армуючих елементів, мм: — 2; - - - 5

при діаметрі армуючого елемента 2 мм температура виливка встановлюється на рівні 1520 °С, тобто весь метал знаходиться у рідкому стані. Збільшення діаметра армуючих елементів до 5 мм призводить до зниження температури нижче температури солідус армуючого елемента (1480 °С). При цьому, якщо об'ємна частка армуючої фази складає до 30 %, температура армуючого елемента вища температури солідус. Збільшення об'єму армуючої фази від 30 до 50 % призводить до значень температури як в армуючому елементі, так і між ними, близької до

1480 °С. Таким чином, армуючий елемент перебуває у двофазному твердо-рідкому стані. У цьому випадку армуюча фаза лише прискорює теплообмінні процеси у виливку в цілому, її фіксації у виливку не відбувається, а лише зменшується температура в поперечному перерізі виливка.

На рис. 4а наведено зміну температури армуючої та рідкої фази з часом для армуючого елемента діаметром 6 мм, об'ємна частка якого складає 20 %. Видно, що за рахунок наявності армуючих елементів маємо велику швидкість охолодження матричного

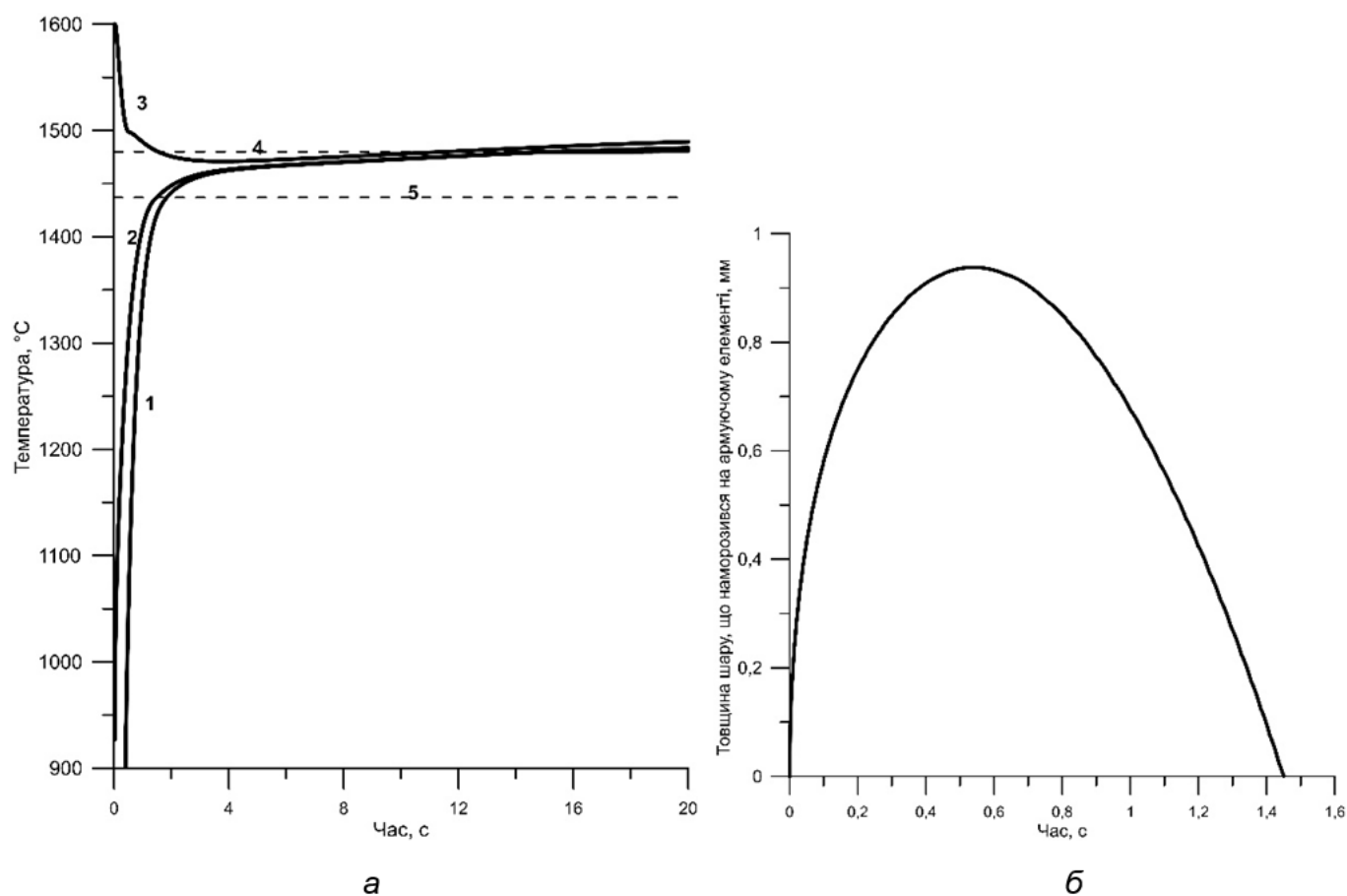


Рис. 4. Зміна температури армуючого елемента та металу під час формування виливка (а) і товщини шару металу, що наморозився на армуючому елементі (б): 1 — центр армуючого елемента; 2 — поверхня армуючого елемента; 3 — по центру в металі між двома армуючими елементами (H/2); 4 — температура солідус армуючого елемента (1480 °С), 5 — температура солідус матричного металу (1437 °С). Об'ємна частка армуючого елемента — 20 %, діаметр армуючого елемента — 6 мм

розплаву протягом 0,53 с (крива 3). Через 2,53 с матричний розплав має температуру нижче температури солідус армуючого елемента, і після 10-ї секунди температура розплаву (матриця + армуючий елемент) встановлюється на рівні температури солідус армуючого елемента (крива 4).

Можна зазначити, що в процесі розігріву армуючого елемента на його поверхні утворюється тверда кірка матричного розплаву (рис. 4, б). Її монотонне збільшення має місце протягом 0,53 секунди до максимального значення 0,94 мм. Після цього через 1,45 секунди кірка повністю розплавляється, і поверхня армуючого елемента досягає температури солідус матричного розплаву.

В табл. 3 наведено дані величини максимального

шару наморозженої кірки на поверхні вставки та час її розплавлення при збільшенні діаметра армуючої фази з 6 до 10 мм. Так маємо на армуючому елементі шар матричного металу, що наморозився, який існує незначний проміжок часу і потім розплавляється під дією температури перегріву розплаву.

При збільшенні об'єму армуючої фази понад 32 % на її поверхні утворюється стійка тверда кірка, тому подальше збільшення армуючої фази недоцільне. Температурні криві, що наведені на рис. 5, для армуючих елементів діаметром 7 та 9 мм при зміні об'ємної частки армуючих елементів дозволяють визначити величину об'ємної частки, що забезпечує рідкофазний зв'язок з матричним сплавом. Так при діаметрі армуючого елемента 7 мм при його об'ємній

Максимальна товщина шару, що наморозився на армуючому елементі ($\delta_{\max}$, мм) та час його існування (τ , с) при зміні об'ємної частки армуючих елементів (V , %) та їх діаметра (d , мм)

Об'ємна частка арм. фази V , %	$d = 6$ мм		$d = 8$ мм		$d = 10$ мм	
	$\delta_{\max}$	τ , с	$\delta_{\max}$	τ , с	$\delta_{\max}$	τ , с
10	0,86	1,25	1,175	2,22	1,47	2,25
20	0,94	1,45	1,27	2,57	2,05	6,24
30	1,8	5,42	2,39	8,02	2,8	12,38
>32	Утворюється стійка тверда кірка					

Примітка: $\delta_{\max}$ — максимальна товщина шару, що наморозився на армуючому елементі (мм);

τ — час існування шару, що наморозився на армуючому елементі (с)

частці менше 21 % армуючий елемент повністю розплавляється. Для армуючого елемента діаметром 9 мм об'ємна частка складає 16 %. Таким чином, можна констатувати, що для кожного діаметра армуючої фази, що розглядалися, було виявлено межу їх об'єму, що призводять до повного розплавлення армуючого елемента, і його використання призводить

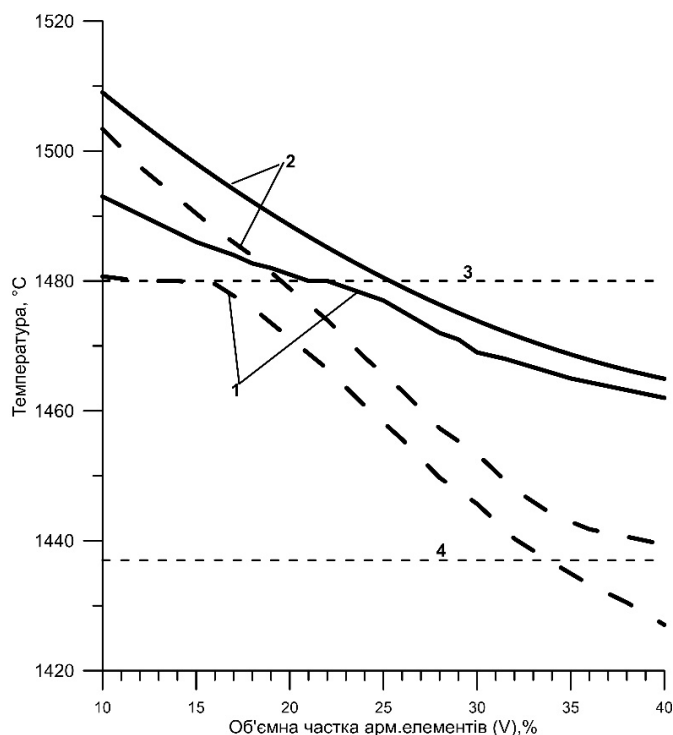


Рис. 5. Зміна температури, що встановилась в центрі армуючого елемента (1) та в матричному розплаві між елементами (2) залежно від об'ємної частки армуючих елементів. Діаметр армуючих елементів, мм:

— 7; - - - 9

до збільшення швидкості охолодження матричного розплаву.

Аналізуючи варіанти армування, що були розглянуті, можна відзначити, що при зміні діаметра армуючої фази від 2 до 5 мм та її об'ємної частки від 10 до 50 % армуючий елемент повністю розплавляється в матричному металі.

Для армуючої фази діаметром від 6 до 10 мм встановлено залежність об'ємної долі армуючого елемента від його діаметра (рис. 6), що забезпечує встанов-

лення температури поверхні армуючого елемента на рівні температури солідус (кр. 1) та температури ліквідус (кр. 2). Область нижче кривої 1 відповідає тому, що армуючий елемент унаслідок взаємодії з рідким металом повністю переходить у рідкий стан. Область між кривими 1 та 2 призводить до того, що поверхня армуючого елемента досягає температури вище солідус, але не вище температури ліквідус, що призводить до рідкофазного з'єднання металу армуючого елемента з матричним сплавом. Область вище кривої 2 відповідає тому, що на армуючому елементі

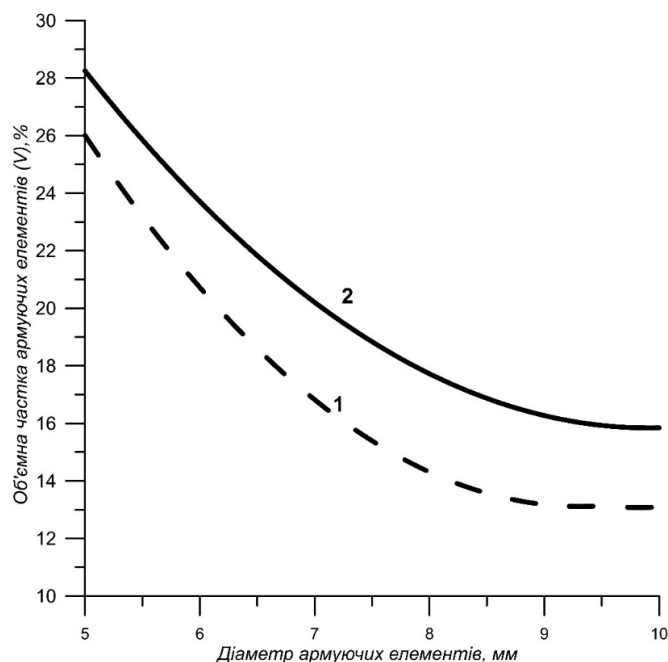


Рис. 6. Залежність об'ємної долі армуючого елемента від його діаметра: 1 — встановлення температури поверхні армуючого елемента на рівні температури солідус; 2 — встановлення температури поверхні армуючого елемента на рівні температури ліквідус

утворюється стійка тверда кірка, при цьому не будуть забезпечені умови для ефективного з'єднання армуючої та рідкої фази в процесі тверднення.

Обробка результатів дослідження методами регресійного аналізу дозволила одержати наступні аналітичні залежності:

$$V_1 = 73,228 - 12,909 \cdot d + 0,693 \cdot d^2; \quad (1)$$

$$V_2 = 66,339 - 10,187 \cdot d + 0,514 \cdot d^2, \quad (2)$$

де V_1 — об'ємна частка армуючого елемента, яка відповідає встановленню на його поверхні температури на рівні температури солідус (часткове плавлення); V_2 — об'ємна частка армуючого елемента, яка відповідає встановленню на його поверхні температури на рівні температури ліквідус (повне розплавлення).

Рівняння дозволяють прогнозувати теплові режими взаємодії для різних комбінацій діаметра та об'ємної частки, оптимізувати параметри лиття, уникаючи дефектів (неповне проплавлення або перегрів), спростити проєктування композитів із заданими властивостями.

Висновки

У роботі було досліджено вплив діаметра та об'ємної частки армуючих елементів на теплові процеси та формування структури композиційного сталевого виливка, за результатами якої можемо зробити наступні висновки:

1. Об'ємне співвідношення матричного сплаву та армуючих елементів (10—31,5 %) критично впливає на якість зчеплення фаз, мікроструктуру та експлуатаційні властивості матеріалу. При збільшенні діаметра армуючих елементів (від 2 до 10 мм) та їх об'ємної частки (від 10 до 50 %) змінюється характер теплової взаємодії між матрицею та армуючою фазою — від повної термічної рівноваги (для діаметрів 2—5 мм армуючих елементів) до локалізованого

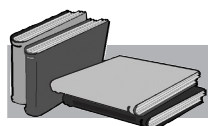
теплообміну з утворенням граничних шарів (для діаметрів 6—10 мм армуючих елементів).

2. При малих діаметрах 2 мм та об'ємній їх частці 10—50 %, а також 5 мм та об'ємній частці до 30 %, армуючий елемент повністю розплавляється, забезпечуючи гомогенізацію структури. При діаметрах 6—10 мм та об'ємній частці до 30 % температура на поверхні армуючого елемента залишається вищою за температуру солідус, що сприяє утворенню міцного з'єднання. При об'ємній частці більше 32 % формується стійка тверда кірка, що погіршує зчеплення фаз.

3. Для кожного діаметра армуючого елемента визначені граничні об'ємні частки, що забезпечують зв'язок з матрицею (наприклад, 21 % для 7 мм, 16 % для 9 мм). Отримано регресійні залежності, що дозволяють прогнозувати температурні умови на поверхні армуючого елемента залежно від його діаметра та об'ємної частки.

Результати дослідження дозволяють оптимізувати технологію лиття композиційних матеріалів, забезпечуючи контроль мікроструктури та механічних властивостей кінцевого виробу.

Робота демонструє, що регулювання діаметра та об'ємної частки армуючих елементів дозволяє керувати тепловими процесами під час лиття, мінімізувати дефекти та підвищувати якість композиційних виливків. Отримані дані можуть бути використані для розробки нових композитних матеріалів із заданими характеристиками.

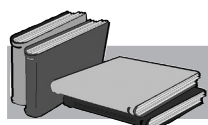


ЛІТЕРАТУРА

1. Simões S. High-Performance Advanced Composites in Multifunctional Material Design: State of the Art, Challenges, and Future Directions. *Materials*. 2024. Vol. 17. Iss. 23. 5997. <https://doi.org/10.3390/ma17235997>
2. Затуловський А.С., Щерецький В.А., Ивахненко М.О. Литые биметаллические втулки с износостойким композиционным слоем. *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>
3. 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. Iss. 3. P. 3340—3347. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.028>
4. Karthikeyan G., Jinu G.R. Dry sliding wear behavior optimization of stir cast LM6/ZrO₂ composites by response surface methodology analysis. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 40. Iss. 3. P. 351—369. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2016-0026>
5. Sree Manu K.M., Ajay Raag L., 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. Iss. 5. P. 2799—2819. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0751-5>
6. 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. Iss. 2. P. 143—149. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.004>
7. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Волянская К.В. Композиционные отливки с регулируемым поверхностным слоем. *Металл и литье Украины*. 2016. Вип. 275. № 4. С. 18—23.
8. Kachold F., Singer R. Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Aluminum Manufactured by High-Pressure Die Casting. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25. Iss. 8. P. 3128—3133. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-1974-y>
9. Das D.K., Mishra P.C., Singh S., Thakur R.K. Properties of ceramic-reinforced aluminium matrix composites — a review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2014. Vol. 9. № 12. P. 1—16. <https://doi.org/10.1186/s40712-014-0012-9>

10. Bahl S. Fiber reinforced metal matrix composites — a review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 39. Part 1. P. 317—323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.423>
11. Morasch A., Wedekind M., Matias D., Baier H. Thermo-mechanical Behavior and Material Failure of Steel Wire Reinforced Aluminum. *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 18. P. 144—149. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.122>
12. Шалевская И.А. Исследование теплообменных процессов в литейной форме с армирующей фазой. *Литье и металлургия*. 2019. № 3. С. 54—59. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-54-59>
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. Вип. 153. № 3. С. 25—33. <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.025>
14. Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Затуловский А.С. Моделирование процесса формирования литых композиционных материалов. *Процессы лития*. 1995. № 4. С. 40—49.

Надійшла 07.08.2025



REFERENCES

1. Simões, S. (2024). High-Performance Advanced Composites in Multifunctional Material Design: State of the Art, Challenges, and Future Directions. *Materials*, 17(23), 5997. <https://doi.org/10.3390/ma17235997>
2. 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].
3. Gowrishankar, M. C., Hiremath, P., Shettar, M., Sharma, S., & Satish, Rao U. (2020). Experimental validity on the casting characteristics of stir cast aluminium composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3340-3347. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.028>
4. Karthikeyan, G., & Jinu, G. R. (2016). Dry sliding wear behavior optimization of stir cast LM6/ZrO₂ composites by response surface methodology analysis. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 40(3), 351-369. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2016-0026>
5. Sree Manu, K. M., Ajay Raag, L., Rajan, T. P. D., Gupta, M., & Pai, B. C. (2016). Liquid Metal Infiltration Processing of Metallic Composites: A Critical Review. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47(5), 2799-2819. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0751-5>
6. Wannasin, J., & Flemings, M. C. (2005). Fabrication of metal matrix composites by a high-pressure centrifugal infiltration process. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(2), 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.004>
7. Yasyukov, V. V., Lysenko, T. V., & Volyanskaya, K. V. (2016). Composite castings with a controlled surface layer. *Metal and Casting of Ukraine*, 4(275), 18-23 [in Russian].
8. Kachold, F., & Singer, R. (2016). Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Aluminum Manufactured by High-Pressure Die Casting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(8), 3128-3133. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-1974-y>
9. Das, D. K., Mishra, P. C., Singh, S., & Thakur, R. K. (2014). Properties of ceramic-reinforced aluminium matrix composites — a review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 9(12), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s40712-014-0012-9>
10. Bahl, S. (2021). Fiber reinforced metal matrix composites — a review. *Materials Today: Proceedings*, vol. 39, part 1, 317-323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.423>
11. Morasch, A., Wedekind, M., Matias, D., & Baier, H. (2014). Thermo-mechanical Behavior and Material Failure of Steel Wire Reinforced Aluminum. *Procedia CIRP*, 18, 144-149. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.122>
12. Shalevskaya, I. A. (2019). Research of heat-exchange processes in a casting form with reinforcing phase. *Litiyo i Metallurgiya (FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY)*, (3), 54-59. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-54-59> [in Russian].
13. Tarasevich, M. I., Shinsky, O. Y., Shalevska, I. A., & Korniets, I. V. (2023). Influence of the mass ratio of the reinforcing element and matrix alloy for forming heterogeneous casting. *Casting Processes*, 153(3), 25-33. <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.025> [in Ukrainian].
14. Tarasevich, N. I., Korniyets, I. V., & Zatulovskiy, A. S. (1995). Modelirovanie protsessa formirovaniya lityih kompozitsionnykh materialov [Modeling the process of forming cast composite materials]. *Casting Processes*, (4), 40-49 [in Russian].

Received 07.08.2025

Summary

M.I. Tarasevich, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Deputy Director, e-mail: nit@ptima.kiev.ua, <https://orcid.org/0009-0007-6271-0146>
O.Y. Shynsky, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Department, e-mail: aluprt@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6200-0709>
I.A. Shalevska, Dr. Sci. (Engin.), Associate Professor, Deputy Director, e-mail: innashalevska@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8410-7045>
I.V. Korniets, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Deputy Head of Department, e-mail: ivk@ptima.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1803-9283>
S.V. Gnyloskurenko, PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of Department, e-mail: slava.vgn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0201-7191>
M.M. Dyachenko, PhD student, e-mail: maximail@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0002-4957-9407>

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

Influence of Diameter and Volume Fraction of Reinforcing Elements on the Formation of Composite Castings

For modern machinery, composite materials are of great importance because they ensure improved properties of parts. The work is dedicated to study the influence of the diameter and volume fraction of the reinforcement elements in the form of rods on the thermal processes that occur during the crystallization and structure formation of cast steel composites. Computational experiment and computer modeling were used to study the thermal interaction between the matrix melt (steel 35) and reinforcing elements (steel 20), phase transformation at their different diameters (2-10 mm) and volume fraction (10-50 %), the formation and growth dynamics of solid crusts at the interface between the "melt – reinforcing element" phases and the critical parameters that ensure optimal connection of the matrix alloy with the reinforcing elements. As a result a critical relationship of the diameter and volume fraction of the reinforcing elements (10–31.5 %) was established, which influences the quality of adhesion (bonding) between phases and the microstructure of the material. Regression models have been developed to predict temperature regimes on the surface of reinforcing elements depending on their diameter and volume fraction and the optimal technological parameters for obtaining composite castings have been determined. With diameters of reinforcing elements of 2 mm and their volume fraction of 10-50 %, as well as 5 mm and their volume fraction up to 30 %, complete melting of the reinforcing phase occurs, which ensures homogenization of the structure. For rod diameters of 6-10 mm their critical (or maximum) volume fractions are indicated: for 7 mm – 21 %, for 9 mm – 16 %, in which optimal phase connection is achieved without creating a stable solid crust. The practical significance of these results lies in the possibility of precise control and optimization of technological parameters when obtaining high-quality cast composites with minimal defects.

Keywords

Reinforced composite casting, casting, heat transfer, phase transformations, diffusion coupling, regression analysis, mathematical modeling.