

<https://doi.org/10.15407/plit2023.03.025>

УДК 621.74.046

М.І. Тарасевич, д-р техн. наук, старш. наук. співроб., заст. директора;
e-mail: nit@ptima.kiev.ua; ORCID 0009-0007-6271-0146

О.Й. Шинський, д-р техн. наук, проф., зав. відділу;
e-mail: aluprt@ukr.net; ORCID 0000-0001-6200-0709

І.А. Шалевська, д-р техн. наук, доц., пров. наук. співроб.;
e-mail: innashalevska@gmail.com; ORCID —0000-0002-8410-7045

І.В. Корнієць, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., заст. зав. відділу;
e-mail: ivk@ptima.kiev.ua; ORCID —0000-0002-1803-9283

ВПЛИВ МАСОВОГО СПІВВІДНОШЕННЯ АРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ТА МАТРИЧНОГО СПЛАВУ НА ФОРМУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ВИЛИВКА

Для одержання виливків зі спеціальними функціональними властивостями металеві сплави армують необхідними компонентами у рідкофазному стані. Для вирішення важливої технологічної проблеми при поєднанні компонентів армованої системи щодо утворення надійного зв'язку на межі «армуючий елемент – матричний сплав» у статті методами математичного та комп'ютерного моделювання досліджено зміну теплового стану армованого виливка в залежності від масового армуючих елементів та матричного сплаву (10–50)%. Об'єктом дослідження обрано циліндричний виливок зі сталі 35Л діаметром 100 мм та висотою 200 мм, армований металевими циліндричними елементами зі сталі 20Л діаметром 10 мм. Початкова температура армуючих елементів становила 20 °С, температура заливання матричного сплаву – 1600 °С. Обчислювальний експеримент проводили з використанням представницького об'єму, який відповідає досліджуваному виливку. Установлено теплофізичні особливості взаємодії рідкої й твердої фаз при формуванні гетерогенного виливка при відповідному масовому співвідношенні компонентів. За результатами обчислювального експерименту у статті наведено графічні залежності зміни температури армуючого елемента та металу під час формування виливка й товщини шару металу, що наморозився на армуючому елементі, при зміні його об'ємної частки. Аналіз зміни температур рідкого металу та армуючого елемента показав, що тепловий потік направлений на розігрів армуючого елемента. Через певний час у системі «армуюча фаза — рідкий метал» встановлюється температура, величина якої залежить від відсотка вмісту армуючої фази. Серія обчислювальних експериментів дозволила встановити, що при вмісті армуючої фази до 13 % поверхня армуючого елемента досягає температури солідусу рідкого металу за 2,25 с. Таким чином, армуючий елемент перебуває у двофазному стані, а армуюча фаза прискорила тепломасообмінні процеси і не зафіксувалась як армуючий елемент у виливку. Надійний дифузійний зв'язок із матричним сплавом забезпечується при вмісті армування від 18 % до 31,5 %, при цьому поверхня армуючого елемента виступає центром кристалізації. Підвищення армуючої металевої фази на понад 32 % при гравітаційному заливанні металу є недоцільним, тому що тоді не будуть

забезпечені умови для ефективного з'єднання армуючої та рідкої фази в процесі тверднення. Одержані результати можуть бути використані при виробництві виливків зі спеціальними функціональними властивостями.

Ключові слова: армований виливок, процес теплопередачі, математичне та комп'ютерне моделювання.

У сучасних умовах потреба у виливках із високими функціональними властивостями спричинена вимогами експлуатації машин та механізмів. Одним із ефективних методів одержання матеріалів зі спеціальними функціональними властивостями є армування сплавів необхідними компонентами. Рідкофазний метод дозволяє виготовляти вироби з мінімальною подальшою механічною обробкою без використання зовнішнього впливу [1, 2].

Серед основних цілей армування можна назвати такі: інтенсифікація масообмінних процесів при формуванні виливка та одержання виливка із заданими експлуатаційними властивостями [3–5].

Для досягнення досконалих результатів щодо суміщення компонентів армованих систем необхідне чітке розуміння технологічних основ такого суміщення, у першу чергу з погляду утворення макрогетерогенних структур, виникнення простого зв'язку між різними елементами системи і, як наслідок, виникнення процесу фізико-хімічної взаємодії на межах їх контакту. З'єднання армуючих елементів (АЕ) із матричним розплавом здійснюється під дією конвекційних і циркуляційних потоків, які виникають у рідкому металі в процесі заповнення ливарної форми [6]. Важливою технологічною проблемою при поєднанні компонентів армованої системи є утворення надійного зв'язку на межі «армуючий елемент — матричний сплав» [7, 8].

Залежно від масового співвідношення армуючого елемента та матричного металу маємо різні умови формування виливка і внаслідок цього різні структурні складові виливка, його фізичні та службові властивості [9, 10].

З огляду на сказане, в цій роботі досліджено зміну теплового стану армованого виливка, який одержують у піщано-глинистій формі залежно від масового співвідношення армуючих елементів та матричного розплаву. Досліди проводились із використанням методів математичного та комп'ютерного моделювання [11].

Об'єктом дослідження обрано циліндричний виливок діаметром 100 мм та висотою 200 мм, армований металевими елементами діаметром 10 мм та висотою 200 мм. Масове співвідношення армуючих елементів до матричного сплаву змінювали від 10 % до 50 %. Температура металу, який заливали (сталь 35), становила 1600 °С, армуючих елементів (сталь 20) — 20 °С. Теплофізичні характеристики матеріалів, що їх використовували при розрахунках, наведено в табл. 1 [12].

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 саму частку армуючого елемента, що і весь виливок (композит). Об'ємну частку армуючих елементів визначали із співвідношення [12]:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot H^2}, \quad (1)$$

де d — діаметр армуючого елемента, H — шаг армування (відстань між центрами сусідніх армуючих елементів).

На рис.1 представлено схему представницького об'єму. Через симетрію щодо вертикальної осі при моделюванні розглядали $\frac{1}{2}$ частину об'єму, що розглядається (рис. 1, пунктирна лінія).

Для досліджуваного виливка в табл. 2 наведено значення шагу армування залежно від об'ємної частки армуючих елементів.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики матеріалів

Матеріал	Сталь 35 (виплинок)	Сталь 20 (армуючий елемент)
Характеристики		
Щільність, 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

Методом обчислювального експерименту проведено оцінку теплового стану досліджуваного виливка при зміні об'ємного співвідношення основного металу та армуючих елементів.

При 10 % армуючої фази відстань між центрами армуючих елементів становить 28 мм. На рис. 2, а показано зміну температури центру армуючого елемента (кр. 1), його поверхні (кр. 2) і температури металу між армуючими елементами (кр. 3) — на відстані 14 мм від центру армуючого елемента.

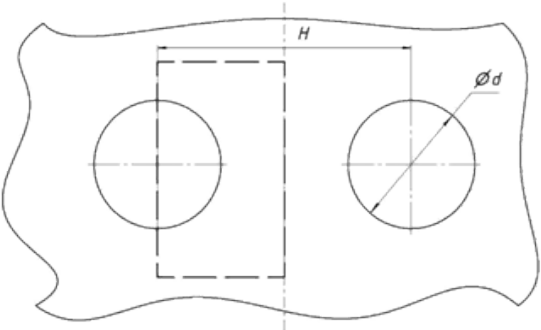


Рис.1. Схема представницького об'єму

Таблиця 2

Шаг армування (H, мм), який відповідає об'ємній частці армуючих елементів (V, %) при діаметрі армуючого елемента 10 мм

V, %	10	15	20	25	30	35	40	45	50
H, мм	28	22,8	19,8	17,72	16,2	14,98	14	13,2	12,5

Видно, що армуючий елемент прогрівається протягом 5 с з 20 °С до 1452 °С по всьому перерізу. За цей час температура металу між армуючими елементами знижується на 80 °С. При відсутності тепловідводу протягом 10 с у системі «армуючий елемент — рідкий метал» установлюється температура 1480 °С.

При контакті перегрітого рідкого металу з армуючим елементом на його поверхні утворюється тверда кірочка, яка збільшується протягом 1,2 с (рис. 2, б) і досягає максимальної товщини 1,47 мм. Після досягнення зазначеної величини за рахунок перегрітого рідкого металу відбувається протягом 2,25 с повне розплавлення кірочки, що утворилася. При зазначеному співвідношенні армуючої та рідкої фази поверхня армуючого елемента досягає температури солідус рідкого металу (1437 °С), що нижча за температуру солідус (1480 °С) матеріалу армуючої фази. Таким чином, армуючий елемент перебуває у двофазному стані. У цьому випадку армуюча фаза прискорила тепломасообмінні процеси і не зафіксувалась як армуючий елемент у виливку.

При зміні об'ємної частки армуючих елементів до 28 % відстань між їхніми центрами становить 16,72 мм (співвідношення (1)), максимальна величина шару, що наморозився на його поверхні, збільшується до 2,05 мм (рис. 3, а). Під дією теплоти перегріву основного металу цей шар розплавляється через 6,24 с. Зміну

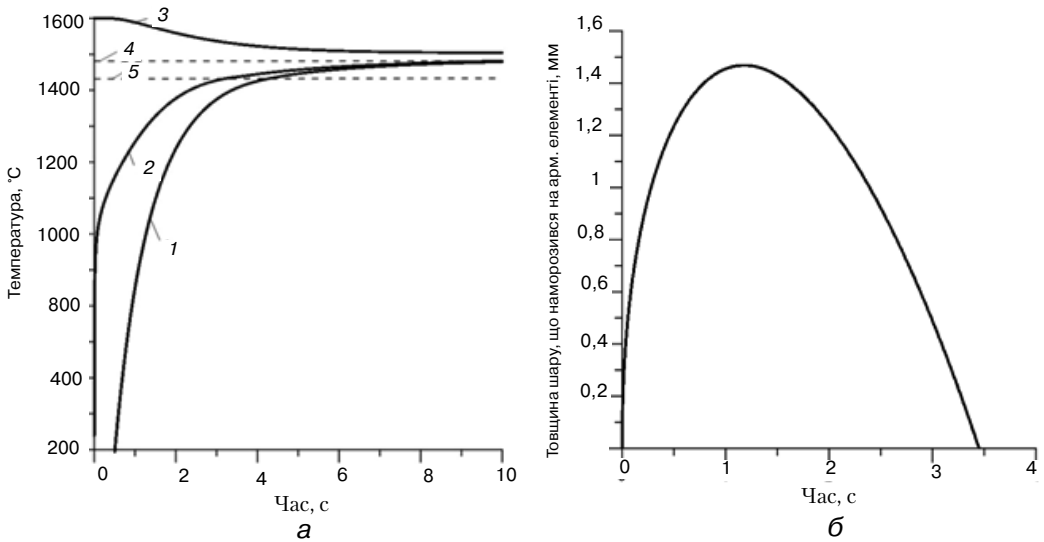


Рис. 2. Зміна температури армуючого елемента та металу під час формування виливка (а) і товщини шару металу, що наморозився на армуючому елементі (б): 1 — центр армуючого елемента; 2 — поверхня армуючого елемента; 3 — по центру між двома армуючими елементами ($H/2$); 4 — температура солідус металу (1480°C); 5 — температура солідус армуючих елементів (1437°C). Об'ємна частка армуючого елемента — 10 %

температури армуючої та рідкої фази в часі представлено на рис. 3, б. Видно, що температура армуючого елемента (кр. 1, 2) встановлюється на рівні 1464°C , що на 16°C нижче за температуру солідус металу армуючого елемента. Очевидно, що і в цьому випадку армуючий елемент не буде зафіксований в об'ємі виливка.

При контакті армуючого елемента, об'ємна частка якого складає 29 %, з рідким металом на його поверхні утворюється тверда кірка матричного металу, яка збільшується протягом 3,4 с (рис. 4, а). За цей час товщина кірки досягає свого максимального значення 3,21 мм. Ця товщина шару утримується впродовж 1,3 с.

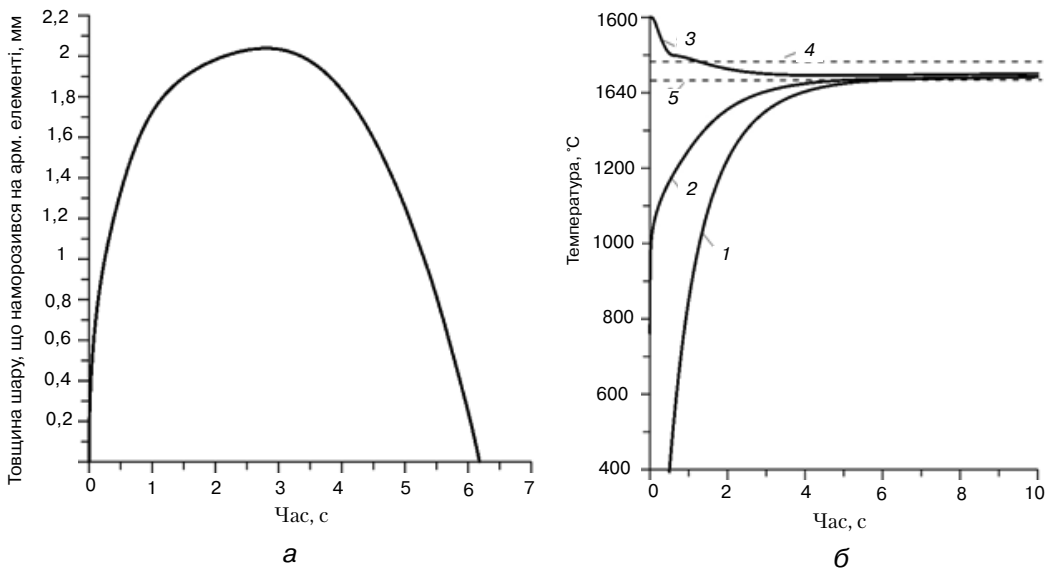


Рис. 3. Зміна товщини шару металу, що наморозився на армуючому елементі (а), і температури армуючого елемента та металу під час формування виливка (б): 1 — центр армуючого елемента; 2 — поверхня армуючого елемента; 3 — по центру між двома армуючими елементами ($H/2$); 4 — температура солідус металу (1480°C); 5 — температура солідус армуючих елементів (1437°C). Об'ємна частка армуючого елемента — 28 %

Кристалізація та структуроутворення сплавів

За цей час поверхня армуючого елемента прогрівається до температури 1410 °С, центр — до 1421 °С (рис. 4, б). Після теплонасичення армуючого елемента за рахунок перегрітого рідкого металу кірка зменшується і через 3,1 с повністю розплавляється. Температура армуючого елемента фіксується на рівні 1404 °С.

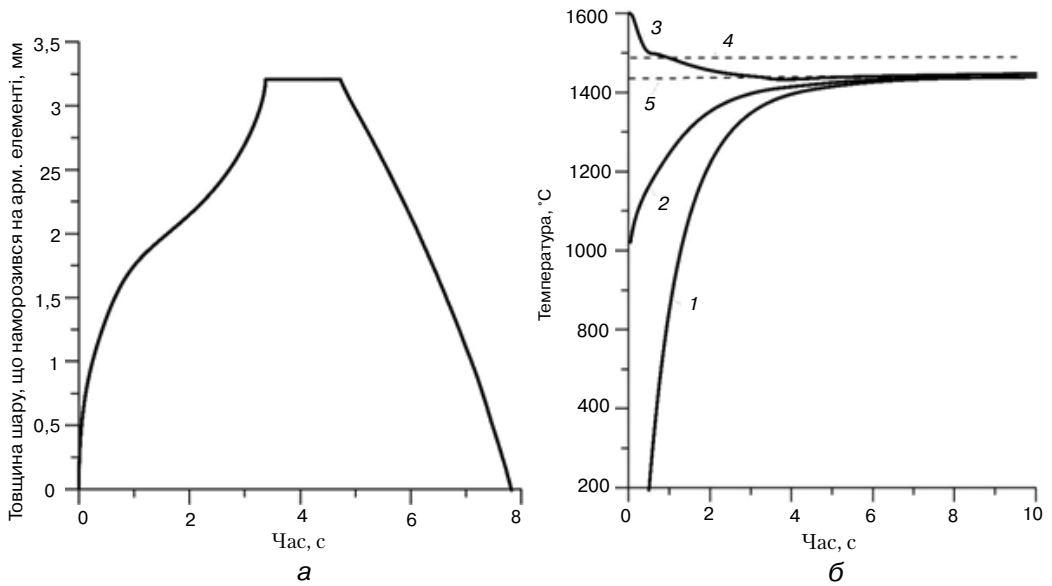


Рис. 4. Зміна товщини шару металу, що наморозився на армуючому елементі (а), і температури армуючого елемента та металу під час формування виливка (б): 1 — центр армуючого елемента; 2 — поверхня армуючого елемента; 3 — по центру між двома армуючими елементами (H/2); 4 — температура солідус металу (1480 °С); 5 — температура солідус армуючих елементів (1437 °С). Об'ємна частка армуючого елемента — 29 %

Такий характер зміни товщини кірки на поверхні армуючого елемента спостерігається при зміні об'ємної частки армуючих елементів до 31,5 % (рис. 5). Товщина шару, що утворився на армуючому елементі, досягає 2,8 мм. На цих позначках маємо «поличку», яка тримається 8,1 с. У подальшому цей шар повністю розплавляється за 1,9 с. Температура армуючого елемента в цей час становить: 1375 °С — на поверхні та 1382 °С — у центрі.

З аналізу зміни температур рідкого металу та армуючого елемента видно, що тепловий потік направлений на розігрів армуючого елемента і через якийсь час (залежно від відсотка армування) градієнт температур по його перерізу становить 1...3 °С. За цей час температура металу знижується на 80...150 °С залежно від відсотка вмісту армуючої фази. Таким чином, через якийсь час у системі «армуюча фаза — рідкий метал» установлюється температура, величина якої залежить від відсотка вмісту армуючої фази. Серія обчислювальних експериментів дозволила встановити вплив відсотка армування на величину температур розплаву та армуючого елемента, які встановилися (рис. 6). Видно, що при армуванні до 13 % армуючий елемент унаслідок взаємодії з рідким металом прогрівається майже до температури солідус матеріалу армуючої фази. Армуючий елемент перебуває у твердо-рідкому стані. При наявності армуючої фази від 13 % до 18 % поверхня армуючого елемента досягає температури солідус. Збільшення кількості армуючої фази понад 18 % призводить до зниження температури поверхні армуючого елемента, і при такому співвідношенні можливе збереження армуючого елемента в об'ємі виливка.

При збільшенні частки армуючих елементів із 32 % до 50 % (зниження об'єму рідкого металу в представницькому об'ємі) на його поверхні утворюється стійка тверда кірка, і тверднення іде послідовно до моменту зустрічі направлених фронтів.

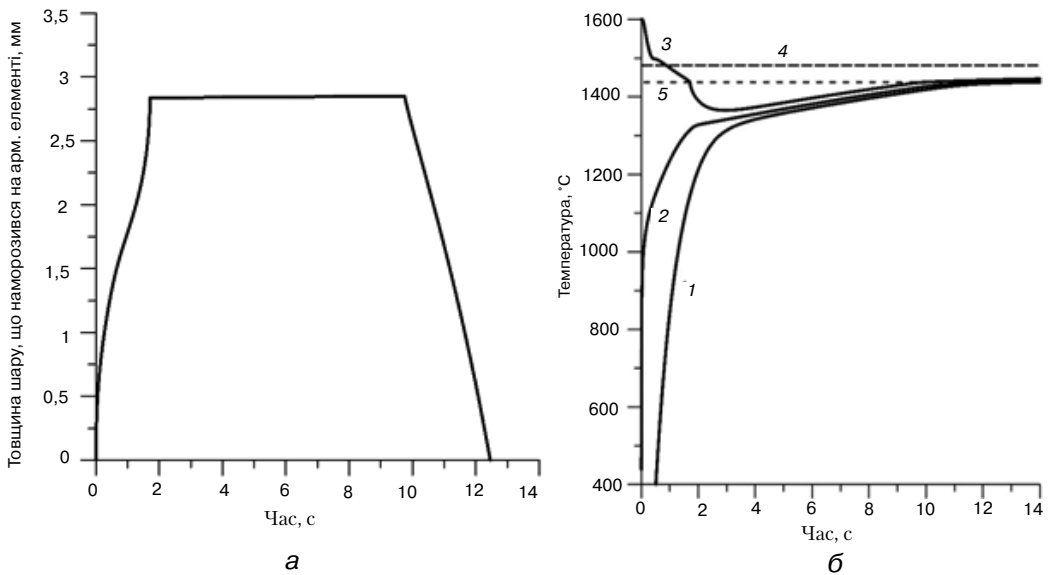


Рис. 5. Зміна товщини шару металу, що наморозився на армуючому елементі (а), і температури армуючого елемента та металу під час формування виливка (б): 1 — центр армуючого елемента; 2 — поверхня армуючого елемента; 3 — по центру між двома армуючими елементами (Н/2); 4 — температура солідус металу (1480 °С); 5 — температура солідус армуючих елементів (1437 °С). Об'ємна частка армуючого елемента — 31,5 %

Таким чином, при контакті рідкого металу з армуючими елементами процес теплопередачі може відбуватись за кількома схемами (при сталих початкових температурах): утворюється стійка тверда кірка на поверхні армуючого елемента, твердіння йде послідовно до моменту зустрічі направлених фронтів; при контакті рідкого металу з холодним армуючим елементом утворюється тверда кірка, яка під дією теплоти перегріву розплавляється. Розігрів армуючого елемента призводить до повторного утворення твердої кірки та послідовного твердіння розплаву.

На основі проведених досліджень встановлено, що:

1) при вмісті армування до 13 % армуючий елемент унаслідок взаємодії з рідким металом практично повністю переходить у рідкий стан і може виконувати тільки роль «холодильника»;

2) при вмісті армування від 13 % до 18 % поверхня армуючого елемента досягає температури солідус, що гарантує рідкофазне з'єднання з матричним сплавом;

3) при вмісті армування від 18 % до 31,5 % поверхні армуючих

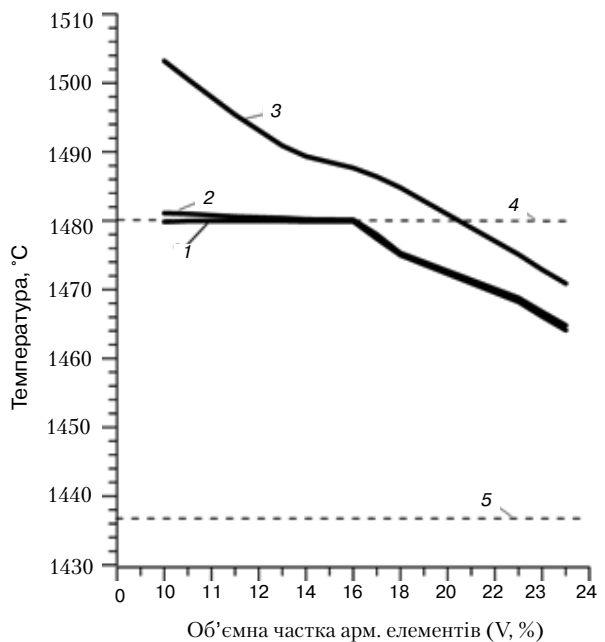


Рис. 6. Зміна установленної температури армуючого елемента та металу при зміні об'ємного співвідношення: 1 — центр армуючого елемента; 2 — поверхня армуючого елемента; 3 — по центру між двома армуючими елементами (Н/2); 4 — температура солідус металу (1480 °С); 5 — температура солідус армуючих елементів (1437 °С)

елементів виступають центрами кристалізації та забезпечують дифузійний зв'язок із матричним сплавом;

4) підвищення армуючої металевої фази на понад 32 % при гравітаційному заливанні металу недоцільне, тому що при цьому не будуть забезпечені умови для ефективного з'єднання армуючої та рідкої фази в процесі тверднення.

Список літератури

- 1 Лысенко Т. В., Ясюков В. В., Прокопович И. В. Концепции управления формообразованием отливок: монография. Одесса: Экология. 2019. 272 с.
- 2 Затуловский С.С., Кезик В. Я., Иванова Р. К. Литые композиционные материалы. Київ: Техніка, 1990. 240 с.
- 3 Ispas V., Minescu M. Analize si incercari privind calificarea unu carp de robinet tip FC 2 $\frac{1}{16}$ x 700 bimetalic. *Metalurgia*. 1998. №8. P.14 — 17.
- 4 Dulaska, A., Studnicki, A. & Szajnar, J. Reinforcing cast iron with composite insert. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2017. 62 (1), P. 355 — 357. DOI: 10.1515/amm-2017-0055.
- 5 Anikeev, A.N., Chumanov, I.V. Microstructure and Hardness of a Dispersion-Reinforced Casting. *Russ. Metall*. 2018. P. 1161—1164. DOI: 10.1134/S0036029518120030.
- 6 Шалевская И.А. Исследование теплообменных процессов в литейной форме с армирующей фазой. *Литье и металлургия*. 2019. 3, 54-59 DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-54-59>.
- 7 Чернышова Т. А. [и др.]. Взаимодействие металлических расплавов с армирующими наполнителями. Наука, 1993. 269 с.
- 8 Shinsky I., Shalevska I., Musbah J. Efficiency of influence of a metal macroreinforcing phase on process of solidification of large-sized castings. TEKA. Edition of Lublin University of technology. 2015, V.15. N. 2. P. 51—59.
- 9 Шалевська І. А., Мусбах Джамал Ібрагім. Отримання литих армованих конструкцій рідкофазним суміщенням компонентів системи. *Процеси лиття*. 2020. 1(139). С. 69—75.
- 10 Корниец И.В. Теплофизика формирования литых материалов, армированных проволокой. *Процессы литья*. 1997. 4. С. 69—73.
- 11 Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Затуловский А. С. Моделирование процесса формирования литых композиционных материалов. *Процессы литья*. 1995. 4. С. 40—49.
- 12 Казанцев Е. И. Промышленные печи. Москва: Металлургия, 1975. 368 с.
- 13 Гольдштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР. 1984. 163 с.

Надійшла 22.05.2023

References

- 1 Lysenko, T. V., Jasjukov, V. V., Prokopovich, I. V. (2019). *Konceptcii upravlenija formoobrazovanijem otlivok: monografija* [Casting Formation Management Concepts: Monograph]. Odessa: Ekologija [in Russian].
- 2 Zatulovskiy S. S., Kezik V. Ya., Ivanova R. K. (1990) *Lityie kompozitsionnyie materialyi*. Kiev: Tehnika, 240 s.
- 3 Ispas V., Minescu M. (1998) *Analize si incercari privind calificarea unu carp de robinet tip FC 2 $\frac{1}{16}$ x 700 bimetalic*. *Metalurgia*. №8. P.14 — 17.
- 4 Dulaska, A., Studnicki, A. & Szajnar, J. (2017). Reinforcing cast iron with composite insert. *Archives of Metallurgy and Materials*. 62 (1), 355-357. DOI: 10.1515/amm-2017-0055 [in English].

- 5 Anikeev, A.N., Chumanov, I.V. (2018). Microstructure and Hardness of a Dispersion-Reinforced Casting. Russian Metallurgy (Metally), 2018, 1161-1164. DOI: 10.1134/S0036029518120030.
- 6 Shalevskaya I.A. (2019). Issledovanie teploobmennyykh protsessov v liteynoy forme s armiruyushey fazoy. Lite i metallurgiya. 3, 54-59 DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-54-59>.
- 7 Vzaimodeystvie metallicheskih rasplavov s armiruyuschimi napolnitelyami (1993). Moskva: Nauka, 269 s. [in Russian].
- 8 Shinsky I., Shalevska I., Musbah J. (2015) Efficiency of influence of a metal macroreinforcing phase on process of solidification of large-sized castings. TEKA. Edition of Lublin University of technology. V.15. N. 2. P. 51—59 [in English].
- 9 Shalevska I. A., Musbakh Dzhamal Ibrahim. (2020) Otrymannia lytykh armovanykh konstruktssii riddkofaznym sumishchenniam komponentiv systemy. *Protsesy lyttia*. 1(139). S. 69—75 .
- 10 Korniets I.V. Teplofizika formirovaniya lityih materialov, armirovanyih provolokoy.(1997). *Protsessyi litya*. 4. S. 69—73 [in Russian].
- 11 11. Tarasevich N.I., Korniets I.V., Zatulovskij A. S. (1995) Modelirovanie processa formirovaniya lityh kompozicionnyh materialov. *Processy litya*. 4. S. 40—49 [in Russian].
- 12 Kazantsev E. I. (1975) *Promyshlennyye pechi*. Moskva: Metallurgiya. 368 s. [in Russian].
- 13 Goldschtik M. A. (1984) *Protsessyi perenosa v zernistom sloe*. Novosibirsk: In-t teplofiziki SO AN SSSR. 163 s. [in Russian].

Received 22.05.2023

M.I. Tarasevich, *Doctor of Technicalsciences, Deputy Director;*

e-mail: nit@ptima.kiev.ua; ORCID —0009-0007-16271-0146

O. Shinsky, *Doctor of Technicalsciences, prof, Head of Department;*

ORCID 0000-0001-6200-0709

I.A. Shalevska, *Doctor of Technicalsciences, leading researcher;*

e-mail: innashalevska@gmail.com ; ORCID 0000-0002-8410-7045

I.V.Korniets, *PhD (Engin.) Senior Research, Depury Head of Department;*

e-mail: ivk@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1803-9283

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

To obtain of castings with special functional properties, metal alloys are reinforced by necessary components in the liquid phase state. To solve an important technological problem when combining the components of a reinforced system regarding formation reliable connection at the boundary "reinforcing element - matrix alloy" in the article, the change in the thermal state of the reinforced casting depending on the mass ratio of reinforcing elements and matrix alloy, which was varied from 10% to 50%, was investigated using mathematical and computer modeling methods. A cylindrical casting made of 35L steel with a diameter of 100 mm and a height of 200 mm, reinforced with cylindrical metal elements made of 20L steel with a diameter of 10 mm, was chosen as the object of the study. The initial temperature of the reinforcing elements was 20 °C; the pouring temperature of the matrix alloy was 1600 °C. The computational experiment was performed using a representative volume that corresponds to the studied casting. The thermophysical features of the interaction of the liquid and solid phases during the formation of a heterogeneous casting with the appropriate mass ratio of the components have been established. Based on the results of a computational experiment, the article provides graphical dependences of the temperature changes of the reinforcing element and metal during the formation of the casting and the thickness of the layer of metal that has frozen on the reinforcing element, when its volume fraction changes. The analysis of change of temperature of the liquid metal and the reinforcing element showed that the heat flow is sent to the heating of the reinforcing element. After a certain time a temperature

is established in the "reinforcing phase — liquid metal" system, the value of which depends on the percentage of the reinforcing phase content. A series of computational experiments made it possible to establish that with a reinforcing phase content of up to 13 percent, the surface of the reinforcing element reaches the solidus temperature of the liquid metal in 2.25 seconds. Thus, the reinforcing element is in a two-phase state, and the reinforcing phase accelerated the heat and mass exchange processes and was not fixed as a reinforcing element in the casting. A reliable diffusion connection with the matrix alloy is ensured at a reinforcement content of 18% to 31.5%, while the surface of the reinforcing element acts as the center of crystallization. Increasing the reinforcing metal phase by more than 32 percent during gravity pouring of metal is impractical, because then the conditions for the effective connection of the reinforcing and liquid phase in the solidification process will not be provided. The obtained results can be used in the production of castings with special functional modeling.

Keywords: reinforced ingot, heat transfer process, mathematical and computer simulation.