

**Л.І. Солоненко**, канд. техн. наук., доц., докторант каф. ливарного виробництва, e-mail: solonenkoli14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

**С.І. Реп'ях**, д-р техн. наук, ст. дослідник, проф. каф. ливарного виробництва, e-mail: 123rs@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>

**К.І. Узлов**, д-р техн. наук, проф., проф. каф. матеріалознавства, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0744-9890>

**В.Ф. Мазорчук**, канд. техн. наук, доц., доц. каф. ливарного виробництва, e-mail: mazorchukvf@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8512-0727>

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

## Вплив ливарної форми і перегріву розплаву алюмінієвої бронзи на структуру виливків і якість їх поверхні

*Роботу присвячено виявленню закономірностей впливу ливарної форми, структурованої в паро-мікрохвильовому середовищі (спосіб паро-мікрохвильового затвердіння – ПМЗ-процес) з піщано-рідкоскляної суміші (ПРС), та перегріву розплаву міді з 9,4 % Al на структуру виливків та якість їх поверхні.*

*У роботі використано стандартні та загальноприйняті методи та методики досліджень. Мета роботи – виявлення закономірностей впливу моноблочної та комбінованої ливарної форми, виготовленої з сухих сумішей, структурованих за ПМЗ-процесом, та перегріву розплаву виливків на структуру та якість їхньої поверхні. Завдання досліджень – встановити вплив вмісту рідкого скла та розмірів піщано-рідкоскляних конгломератів ПРС, температури перегріву розплаву алюмінієвої бронзи на структуру виливків, якість їх поверхні, швидкість затвердіння, оптимізувати склад ПРС за вмістом рідкого скла та розмірами її піщано-рідкоскляних конгломератів.*

*Встановлено, що суміші, які структуровані за ПМЗ-процесом з 1,5 % рідкого скла та розмірами конгломератів до 0,315 мм, дозволяють отримувати мідні та бронзові виливки без пригару (купрату натрію). При цьому, ПРС з розмірами конгломератів до 0,315 мм і більше 0,315 мм рекомендовано використовувати, відповідно, як формувальну суміш для виливка та як теплоізоляційну суміш для його ливникової системи.*

*Зі збільшенням перегріву розплаву з 80 до 130 °C час затвердіння розплаву у ливарних формах, структурованих за ПМЗ-процесом, збільшується. При цьому з підвищенням перегріву найбільш інтенсивно зростає тривалість кристалізації розплаву при незначному збільшенні відведення часу теплоти перегріву від розплаву. Залежність швидкості об'ємного затвердіння від вмісту у ПРС рідкого скла в межах від 0,5 до 2,5 % носить екстремальний характер з максимумом при вмісті 1,5 % рідкого скла.*

*Макроструктура виливків зі зміною вмісту в ПРС рідкого скла практично не змінюється, але переходить з дрібнокристалічної у великокристалічну зі збільшенням температури перегріву розплаву при заливанні. За результатами виконаних досліджень розроблено рекомендації щодо застосування ПРС, структурованих за ПМЗ-процесом, для виробництва виливків.*

**Ключові слова:** ливарна форма, структура, структурування, рідке скло, бронза, швидкість затвердіння, теплоізоляційна суміш.

**Вступ.** Поряд із модифікуванням розплаву, фізичним впливом на розплав при його затвердінні, підвищенням чистоти сплаву за домішками та неметалевими включеннями тощо, зміна перегріву розплаву при плавці і швидкості його затвердіння в ливарній формі відносяться до найбільш ефективних способів управління як структурою, так і, відповідно, рівнем властивостей литого металу [1–12]. Тим не менш, на сьогоднішній день, у зв'язку з великим розмахом ливарних сплавів, способів формоутворення і структурування формувальних матеріалів, дані про вплив перегріву розплаву і властивостей ливарної

форми на структуру виливків і якість їх поверхні носять фрагментарний характер.

Зокрема, дотепер такі дані відсутні для інноваційного способу (Пат. UA № 122538, від 25.11.2020, Пат. UA № 149146, від 20.10.2021) виготовлення комбінованих ливарних форм із сухих сумішей, структурованих у паро-мікрохвильовому середовищі (спосіб паро-мікрохвильового затвердіння ПМЗ-процес).

Механічні, технологічні, експлуатаційні властивості, корозійна, ерозійна та кавітаційна стійкість, надійність, довговічність, ремонтпридатність, зварюваність сплавів є їх структурно чутливими характерис-

тиками, параметрами та властивостями. Виходячи з цього, проблемі управління структурою литої заготовки нині присвячено значну кількість досліджень [3–11].

До числа найбільш простих та ефективних способів впливу на структуру литих сплавів відносяться перегрів розплаву при плавці та зміна інтенсивності тепловідведення від виливка при його затвердінні. При цьому вплив величини перегріву розплаву при плавці на зміну структури виливка реалізується як через механізм збереження спадковості шихти, так і через збільшення у розплаві числа кластерів, здатних при охолодженні стати центрами його кристалізації [11].

Вплив ливарної форми на структуру виливків та якість їхньої поверхні реалізується переважно за рахунок, відповідно, зміни інтенсивності тепловідведення від виливків та міцності поверхневого шару форми. В останньому випадку міцність поверхневого шару форми визначає ступінь його руйнування при протяжці ливарної форми (при витягуванні постійної моделі виливка з ливарної форми або напівформи).

При традиційних способах структуроутворення формувальних сумішей інтенсивність тепловідведення від виливка підвищують шляхом збільшення по-

казника теплоакумлюючої здатності ливарної форми ( $b_2$ ) або зниження її початкової температури [2, 12]. З цієї метою у формувальній суміші, наприклад, кварцовий пісок замінюють цирконовим, що збільшує величину  $b_2$  або формувальну суміш заморожують, використовуючи воду в суміші як її сполучний матеріал.

Особливістю структурування піщано-рідкоскляних сумішей (ПРС) за ПМЗ-процесом є можливість змінювати величину  $b_2$  не тільки шляхом зміни їх хімічного, але і фракційного складу піщано-рідкоскляних конгломератів, які виникають під час процесу плакування кварцового піску рідким склом.

Крім структури виливків, теплофізичні властивості ливарної форми визначають і ефективність їх живлення від надливів та живильників ливникової системи. Ефективність живлення виливка під час його затвердіння оцінюють величиною перепаду температури між розплавом у надливу та у виливку, величиною співвідношення часу затвердіння розплаву у надливу та у виливку, величиною усадкових дефектів у виливку, герметичністю виливка та рядом інших показників.

Тобто, для отримання найбільш щільного металу у виливку слід забезпечити такі умови його охолоджен-

Таблиця 1

**Склади теплоізоляційних сумішей для ливарних форм**

Номер патенту, дата публікації	Вміст в суміші, %мас.	
	Сполучна речовина	Компоненти-наповнювачі
RU № 2688351 (21.05.2019)	алюмохромфосфат (6–10)	трепел (6–10), ековата (4–8), пісок кварцовий (50–56), борат гексаметилентетраміну (20–30)
RU № 2614481 (28.03.2017)	алюмохромфосфат (7–12)	трепел (5–10), ековата (15–20), маршаліт (10–15), пісок кварцовий – решта
RU № 2455108 (10.07.2012)	магнійалюмофосфат (7–10)	трепел (8–12), торф низької міри розкладання або кізельгур (5–60), пісок кварцовий – решта
RU № 2365561 (27.08.2009)	фосфатна суспензія (15–65)	один з матеріалів: шамот, глинозем, корунд, керамзит, цегляний бій (35–85) + спучений перліт і/або спучений вермикуліт
RU № 2356688 (27.05.2009)	алюмохромфосфат (8–12)	Трепел (5–10), відхід вагранкового виробництва – решта
RU № 2296646 (10.04.2007)	злакове сполучне (18–25)	вата целюлозна (4–80), пісок кварцовий – решта
RU № 2093306 (20.10.1997)	фосфатне сполучне (7–15)	тирса деревна (25–30), глина каолінова (15–20), порошок алюмінієвий (10–15), пісок кварцовий – решта
SU № 749564 (23.07.80)	цемент фосфатний (15–25) + вода (24,5–32,5)	перліт спучений (17,5–37,5), плигорскіт (2,5–17,5), речовина вуглецьвмісна (2,5–8,0), глина вогнетривка (2,5–15)
SU № 679312 (15.08.1979)	будь-який сполучний матеріал – залишок	перліт спучений (12,5–25,0), азбест (3–10), пісок аглопоритовий на основі крем'янистих опалових порід (1,5–12,5), тирса деревна, оброблені галуном (2,5–10), глина (5–10)
SU № 565774 (25.07.1977)	кислота ортофосфорна (8–11)	боксит мелений (4–7), перліт спучений – решта
SU № 510315 (15.04.1976)	рідке скло (10–35)	тирса деревна (5–30), кокс мелений (5–30), натрідкий (0,5–1,5), пісок кварцовий – решта
SU № 501828 (05.02.76)	рідке скло – залишок	перліт спучений (10–45), шунгізит (25–60) або пемза шлакова (10–80), глина вогнетривка (0,1–15)

## Склад та властивості теплоізоляційних сумішей [13]

Матеріал	Масовий вміст в суміші, %									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тирса деревна							25	28		30,5
Порошок деревний							10	7		5,5
Глина каолінова	11	10	9				20	18		13,5
Пісок кварцовий	60	63	68			60	25	28	50	19,5
Порошок алюмінію							10	12		15,5
Ековата	16	15	13							
Шлак вагранний				85	88					
Тремтів				5	7	5			10	
Торф						25			30	
Вода	13	12	10	15	12	до пластичного стану суміші				15,5
Металофосфатні сполучні матеріали*						10	10	7	10	
<b>Властивості суміші</b>										
Межа міцності при розтягуванні, МПа:	0,35	0,32	0,30	0,41	0,40	0,37	0,20	0,21	0,53	0,28
– у сухому стані	0,043	0,042	0,041	0,044	0,043	0,035	0,042	0,035	0,048	0,044
– у сирому стані										
Обсипальність, %	0,30	0,35	0,37	0,50	0,60	0,40	0,60	0,70	0,10	0,70
Коефіцієнт теплопровідності при 1300 °С, Вт/(м·К)	0,15	0,17	0,18	0,25	0,27	0,33	0,27	0,26	0,28	0,26

Примітка: \*алюмохромофосфат, магнійхромофосфат і т. п.

ня, при яких розплав у виливку твердіє раніше, ніж у надливі. На думку авторів роботи [13] оптимальних умов формування виливка можна досягти при співвідношенні швидкостей відведення теплоти від виливка та від надливу у форму, що дорівнює  $f = 2/1$  або  $f = 1,5/1$ . Тобто, відповідно до [13], швидкість затвердіння розплаву у виливку має бути більшою за швидкість затвердіння розплаву в надливі в 1,5–2,0 рази.

Такого співвідношення швидкостей досягають за рахунок збільшення розмірів надливу, використання у виливках внутрішніх і зовнішніх холодильників, дуговим, індукційним та іншими методами підігріву розплаву в надливі під час затвердіння розплаву у виливку і т. п. При цьому, дані способи реалізують у ливарних формах моноблочного типу, де виливок та його ливникова система оформлені (оточені) єдиною формувальною сумішшю.

На відміну від моноблочних ливарних форм у комбінованих ливарних формах елементи ливникової системи, що живлять виливок, оформлені теплоізоляційною сумішшю [13–15].

Теплоізоляційні суміші для ливарних форм у структурованому стані є високопористими виробами з низькою теплопровідністю, які істотно відрізняються за складом і властивостями від формувальних сумішей. Про це свідчить аналіз даних табл. 1 та табл. 2.

**Постановка задачі.** Істотними недоліками всіх відомих ливарних теплоізоляційних сумішей є їх багатоконпонентність та вміст матеріалів нестабільного хімічного складу. Ці обставини є основними причинами нестабільності теплофізичних властивостей (ефективності застосування) таких сумішей та значних витрат на їх виробництво. Виробництво теплоізоляційних сумішей з металофосфатами та цементом, крім цього, характеризуються низьким рівнем санітарно-гігієнічної безпеки, а застосування таких сумішей у складі ливарних форм створює ще й проблеми з їх вторинним використанням, регенерацією піску та утилізацією відпрацьованої суміші.

У піщано-рідкоскляних сумішах, що структуровані за ПМЗ-процесом, де використовують тільки натрієве рідке скло, воду і пісок (кварцовий, цирконовий і т. п.) ці недоліки відсутні. Тим не менш, дані про можливість способу ПМЗ на сьогодні носять фрагментарний характер, що є однією з причин, які стримують використання його в ливарних цехах. У зв'язку з цим, виявлення закономірностей впливу складу, способу структурування суміші ливарної форми та перегріву розплаву на структуру виливків та якість їх поверхні є актуальним завданням.

**Мета роботи і завдання досліджень.** Мета роботи – виявлення закономірностей впливу моноблоч-

ної та комбінованої ливарної форми, виготовленої із сухих сумішей шляхом структурування у паро-мікрохвильовому середовищі, та перегріву розплаву алюмінієвої бронзи на структуру та якість поверхні виливків.

Завдання досліджень – встановити вплив вмісту рідкого скла та розмірів кварцово-рідкоскляних конгломератів ПРС, температури перегріву розплаву алюмінієвої бронзи на структуру виливків, якість їх поверхні, швидкість затвердіння; визначити у складі ПРС вміст рідкого скла та розміри кварцово-рідкоскляних конгломератів, що забезпечують виливкам найбільшу та найменшу швидкість затвердіння.

**Об'єкт і методика досліджень.** Об'єкт досліджень – виливки, що отримані у піщано-рідкоскляних формах, які структуровані за ПМЗ-процесом та звичайною конвективною сушкою на повітрі.

В роботі використовували кварцовий пісок марки  $1K_2O_2O_2$ , воду, натрієве рідке скло (РС) з питомою щільністю  $1,44 \text{ г/см}^3$  і силікатним модулем 2,9. Структурування сумішей за ПМЗ-процесом впродовж 4 хвилин проводили в картонних стаканах з водяним зарядом масою 1 г, використовуючи мікрохвильову піч з частотою випромінювання 2,45 ГГц і потужністю магнетрона 700 Вт. Структурування ПРС ливарних форм тепловим сушінням проводили при  $200 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  впродовж 2 годин.

Макроструктуру зразків оцінювали візуально, мікроструктуру досліджували на оптичному мікроскопі при збільшенні  $\times 100$ . Для дослідження макроструктури зразки обробляли впродовж 1 хвилини в 50 % розчині азотної кислоти в дистильованій воді при кімнатній температурі.

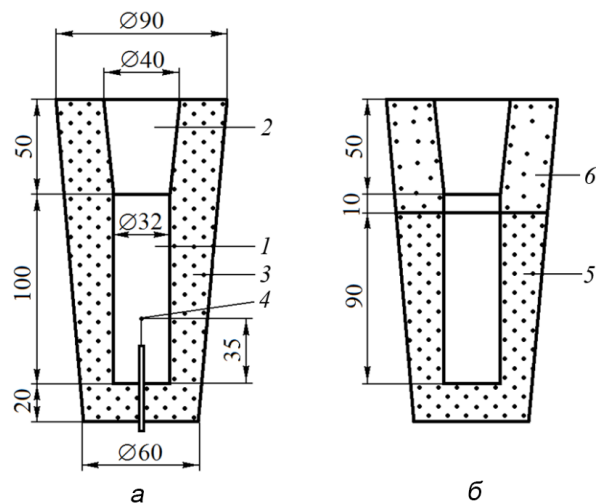
Виплавку алюмінієвої бронзи (Cu+9,4 % Al) проводили в індукційній печі з графітовим тиглем, використовуючи мідь марки М2 та алюміній технічної чистоти. Щільність зразків виготовленої бронзи визначали методом гідростатичного зважування. Масу визначали шляхом зважування на електронних вагах з точністю 0,01 г. Для виготовлення моноблочних та комбінованих ливарних форм за схемою на рис. 1, використовували моделі виливків та надливів з поліпропілену та гіпсу марки Г22.

Коефіцієнт термічного лінійного розширення зразків гіпсу Г22 та поліпропілену визначали на їх зразках  $(200-210) \times 20 \times 20 \text{ мм}$  за допомогою електронного штангенциркуля з точністю 0,001 мм шляхом визначення зміни довжини зразків до та після нагрівання від  $t_1 = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 130 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  за формулою:

$$\alpha = (l_2 - l_1) / (t_2 - t_1), \quad (1)$$

де  $l_1, l_2$  – довжина зразка до і після нагрівання, відповідно, м.

Відповідно до рис. 1, циліндричні виливки виготовляли шляхом заливання розплаву у моноблочні та комбіновані форми. Час затвердіння виливків визначали за результатами їх термографування хромель-алюмелевою термопарою з діаметром електродів 0,2 мм у комплекті з електронним потенціометром. Гарячий спай термопари діаметром 0,30–0,32 мм формували в результаті зварювання електродів та



**Рис. 1.** Схеми моноблочної (а) та комбінованої (б) ливарних форм: 1 – робоча порожнина форми; 2 – надлив відкритого типу; 3 – ливарна форма з конгломератів кварцового піску розмірами менше 0,315 мм; 4 – гарячий спай термопари; 5 – нижня частина ливарної форми з конгломератів кварцового піску розмірами менше 0,315 мм; 6 – верхня частина ливарної форми з конгломератів кварцового піску розмірами 0,315–0,630 мм

не виконували його вогнетривкого захисту для виміру температури.

Схильність ПРС до виникнення пригару оцінювали за результатами візуального огляду поверхні виливків з міді та мідних сплавів  $\varnothing 32 \times 100 \text{ мм}$ . Ливарні форми для виливків з міді та мідних сплавів виготовляли із ПРС з 5 % РС шляхом ударно-механічного ущільнення ПРС та її наступного сушіння при  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  впродовж 2 годин, а також з кварцового піску, плакованого 1,5 % РС, просіяного через сито з коміркою 0,315 мм, ущільненого вібрацією та структурованого за способом ПМЗ.

Як відомо, розрахунок істинної лінійної швидкості просування фронту кристалізації (затвердіння) розплаву в ливарній формі можна здійснити тільки для розплавів, затвердіння яких проходить зі строго вираженою поверхнею фронту кристалізації (для чистих металів та евтектичних сплавів). У разі наявності двофазної зони на фронті кристалізації або у разі об'ємного характеру затвердіння розраховують середню об'ємну швидкість кристалізації. Оскільки середня об'ємна швидкість кристалізації ( $V_C$ ) дорівнює величині, зворотного часу повного затвердіння виливка ( $\tau_3$ ) у його контрольному перерізі [16], то її величину розраховували за формулою:

$$V_C = R / \tau_3, \quad (2)$$

де  $R$  – радіус циліндричного виливка ( $R = 16 \text{ мм}$ ).

Оптимальний хімічний та фракційний склад ПРС за величиною  $V_C$  визначали на виливках, відлитих у моноблочні ливарні форми (див. рис. 1а), що структуровані за ПМЗ-процесом. Вибір проводили за результатами реалізації методу симплекс-планування експерименту за неповним третім планом Г. Шеффе та побудовою ізолінії на симплексному трикутнику, відповідно до його ключа, що представлено на рис. 2.

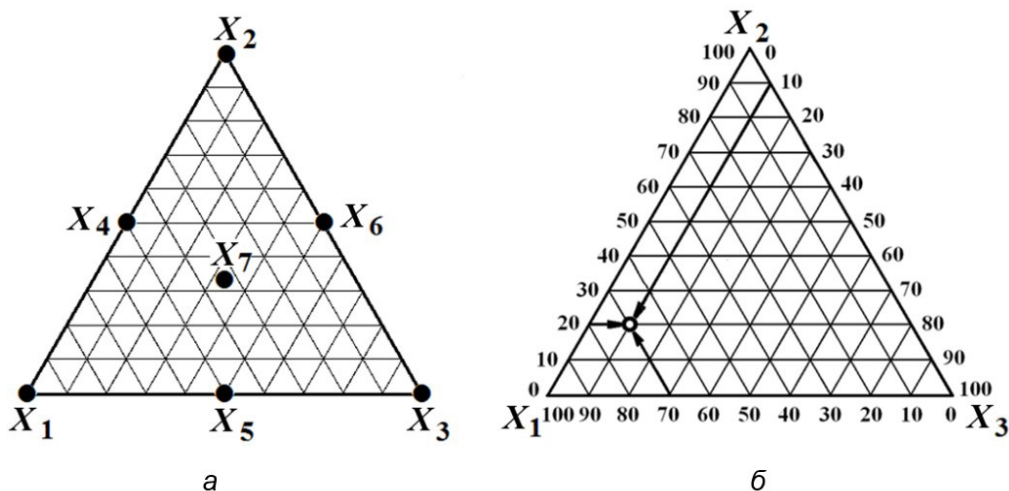


Рис. 2. Симплексний трикутник (а) та його ключ (б)

Розрахунок об'ємної швидкості затвердіння циліндричних виливків проводили за формулою (2).

Оскільки реалізація плану Г. Шеффе передбачає побудову моделі неповного куба у потрійній системі:

$$Y = \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \beta_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (3)$$

де  $Y$  – швидкість затвердіння;  $\beta$  – коефіцієнт регресії;  $x$  – кількість матеріалу у суміші, то коефіцієнти регресії у формулі (3) розраховували за формулами:

$$\beta_1 = \xi_1, \quad \beta_{ij} = 4 \cdot \xi_{ij} - 2 \cdot \xi_i - 2 \cdot \xi_j,$$

$$\beta_{123} = 27 \cdot \xi_{123} - 12 \cdot (\xi_{12} + \xi_{13} + \xi_{23}) + 3 \cdot (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3),$$

де  $\xi_i, \xi_j, \xi_{123}$  – результати дослідів ( $V_C$ ) у точках симплексних трикутників.

**Результати досліджень.** Для порівняльної оцінки впливу способу структурування ПРС на якість поверхні виливків у ливарних формах, які виготовлені відповідно до рис. 1а, були відлиті циліндричні виливки з міді, як найбільш хімічно активного матеріалу по відношенню до РС.

У дослідженнях використовували ливарні форми з ПРС з 5 % РС, які після ущільнення сушили при 200 °С протягом 2 годин, та форми, виготовлені за ПМЗ-процесом, з кварцового піску, плакованого 1,5 % РС. Заливання розплаву міді проводили з перегріванням 105–110 °С. Вид поверхні виливків після їх вибивання та очищення металевою щіткою представлений на рис. 3.

З аналізу виду поверхонь мідних виливків на рис. 3 випливає, що на відміну від виливка отриманого в ПРС, яку структурували тепловим сушінням, виливок, який отримано в ПРС, яку структурували за ПМЗ-процесом, після обробки металевою щіткою не має пригару. Тобто, на поверхні виливка, залитого у форму, яка була висушена за загальноприйнятою технологією, є термохімічний пригар, який являє собою шар формувальної суміші чорного кольору товщиною до ~1,5 мм, що пригоріла до виливка.

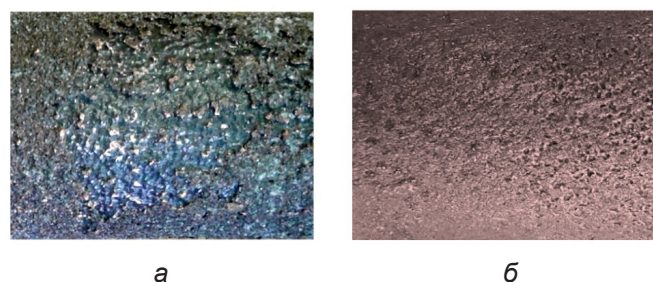


Рис. 3. Вид поверхні мідного виливка, відлитого у ливарну форму з ПРС після теплового сушіння (а) та у ливарну форму, виготовлену за ПМЗ-процесом (б)

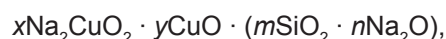
Виходячи з того, що випробувані ПРС у структурованому стані газопроникні, а температура заливання розплаву міді у форми становила ~1210 °С, то ймовірною причиною виникнення такого виду пригару стало окислення міді на межі контакту її розплаву з формою:



і поява купрату натрію в результаті взаємодії оксиду міді (II) з оксидом натрію зі складу силікату натрію ПРС:

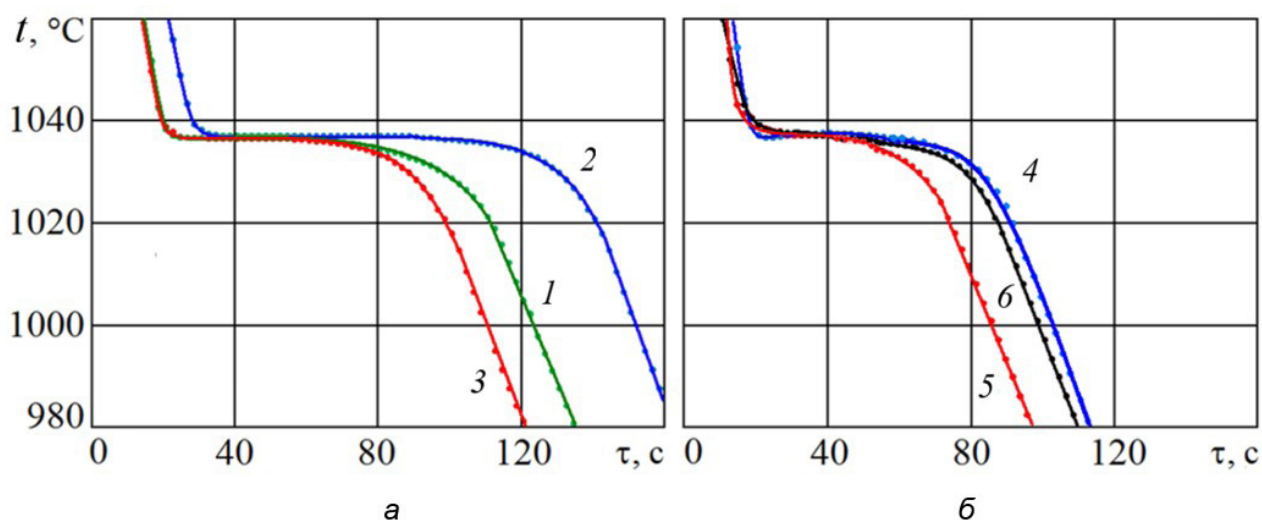


з подальшим розчином купрату натрію в частині силікату натрію в даному шарі ПРС. Як результат, охолоджені до температури навколишнього середовища міжзеренні манжети сполучного матеріалу в шарі пригару, очевидно, є сплавом наступного хімічного складу:



який не лише надав шару пригару чорний колір, а й високу міцність та силу адгезії до поверхні мідного виливка.

Для порівняльної оцінки впливу способу структурування ПРС та розмірів піщано-рідкоскляних конгломератів кварцового піску, плакованого РС, на час і швидкість об'ємного затвердіння виливків провели



**Рис. 4.** Термограми затвердіння та охолодження циліндричних виливків (Ø32×100 мм) із алюмінієвої бронзи, що була перегріта при заливці у ливарні форми на 130 °С (а) та на 80 °С (б): 1 – ливарна форма типу А; 2 – ливарна форма типу В; 3, 5 – ливарна форма типу С; 4 – ливарна форма типу D; 6 – ливарна форма типу Е

Таблиця 3

**Результати термографування затвердіння циліндричних виливків (Ø32×100 мм) з алюмінієвої бронзи**

Тип ливарної форми	Перегрів розплаву, °С	Час, с			V <sub>c</sub> , мм/с
		відводу теплоти перегріву	кристалізації	затвердіння	
A	130	20	34	54	0,296
B		28	62	90	0,178
C		20	27	47	0,340
D	80	18	34	52	0,308
C		16	18	34	0,471
E		17	23	40	0,400

термографування циліндричних виливків, що були залиті в моноблочні форми (див. рис. 1а).

У дослідженнях використовували ливарні форми таких типів:

- *тип А* – свіжоприготовлена суміш кварцового піску з 5 % РС, ущільнена ударно-механічним способом, структурована тепловим сушінням на повітрі при 200 °С протягом 2 годин;

- *тип В* – суміш конгломератів кварцових частинок з розмірами від 0,315 до 0,63 мм, плакованих 1,5 % РС, ущільнена вібрацією, структурована за способом ПМЗ;

- *тип С* – суміш конгломератів кварцових частинок з розмірами менше 0,315 мм, плакованих 1,5 % РС, ущільнена вібрацією, структурована за способом ПМЗ;

- *тип D* – суміш конгломератів кварцових частинок з розмірами менше 0,315 мм, плакованих 0,5 % РС, ущільнена вібрацією, структурована за способом ПМЗ;

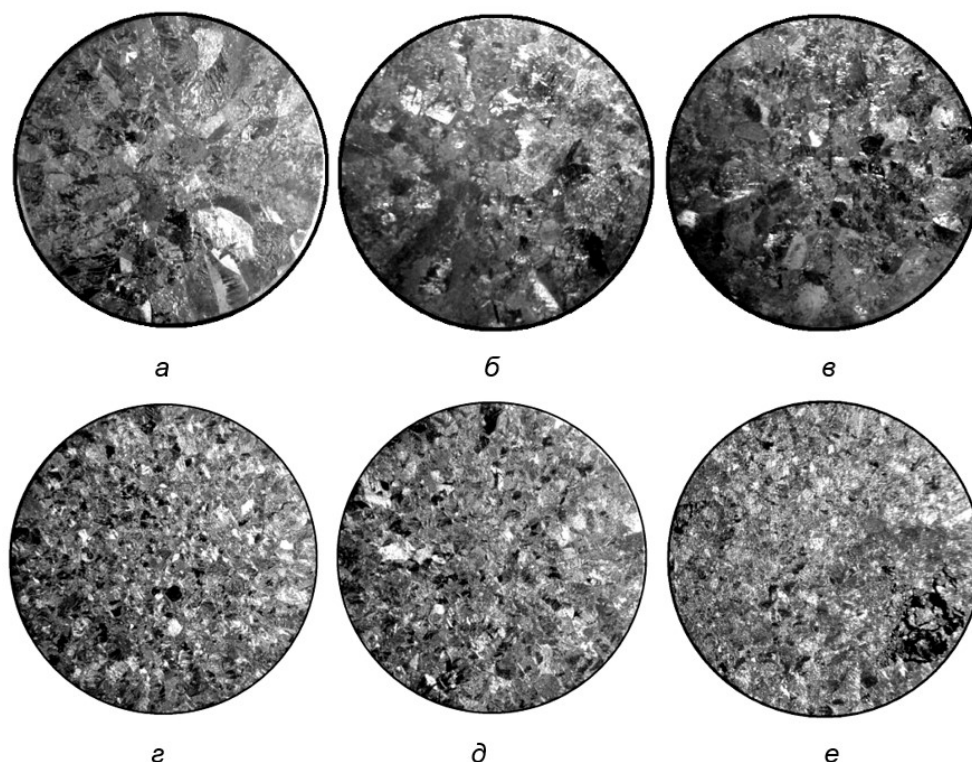
- *тип Е* – суміш конгломератів кварцових частинок з розмірами менше 0,315 мм, плакованих 2,5 % РС, ущільнена вібрацією, структурована за способом ПМЗ.

Отримані результати термографування виливків надано на рис. 4 та наведено в табл. 3.

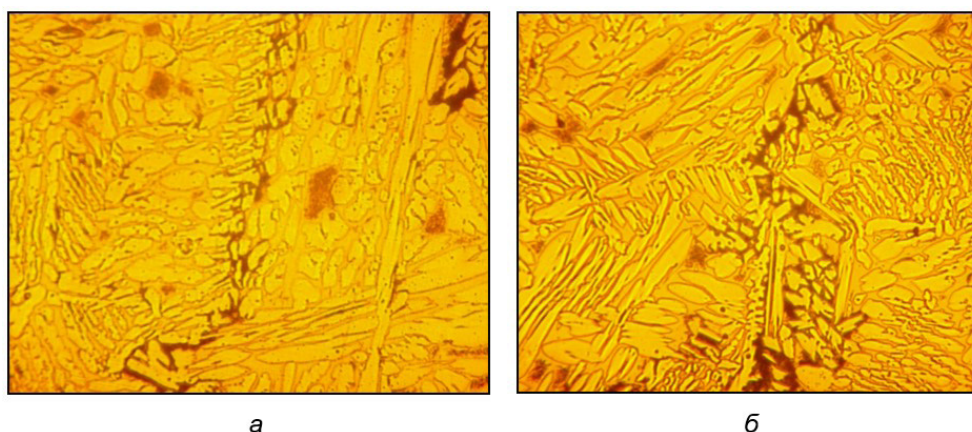
Структури виливків з бронзи БрА9, яка була залита у ливарні форми різного типу з різним перегрівом, представлені на рис. 5 і рис. 6.

За результатами досліджень встановлено, що для даних умов швидкість об'ємного затвердіння виливків з алюмінієвої бронзи, яку забезпечують ливарні форми з ПРС, що структуровані тепловим сушінням, складає 0,296 мм/с (див. табл. 3). В даний час бронзові виливки в ливарних цехах виготовляють і в ливарних формах з ПРС з 5 % РС, структура та механічні властивості яких відповідають рівню вимог, що висуваються до них. Виходячи з цього, для подальших досліджень граничним значенням була прийнята мінімально-припустима швидкість об'ємного затвердіння досліджуваних виливків з алюмінієвої бронзи на рівні 0,3 мм/с.

З аналізу макроструктур на рис. 5 випливає, що розмір макрозерен у виливках із алюмінієвої бронзи залежить виключно від величини перегріву її розплаву при плавці і зі зниженням перегріву зменшується. В той же час, розмір конгломератів ливарної форми практично не впливає на розмір мікрозерен, про що свідчить аналіз мікроструктур рис. 6. З викладеного випливає, що теплофізичні особливості різноконгломератних сумішей доцільно використовувати виключ-



**Рис. 5.** Макроструктура ( $\times 1,5$ ) виливків із бронзи БрА9, перегрітої на 130 °С та залитої в ливарні форми типу А (а), В (б), С (в), перегрітої на 80 °С та залитої в ливарні форми типу D (г), С (д), Е (е)



**Рис. 6.** Мікроструктура ( $\times 100$ ) виливків із бронзи БрА9, перегрітої на 130 °С та залитої в ливарні форми типу В (а) та типу С (б)

но з метою покращення умов живлення виливків при затвердінні та зменшення витрат рідкого металу на їх надливи.

Особливістю виливків, виготовлених у ливарній формі типу Е, є значні за розміром об'єми локальної усадкової пористості, хаотично розташовані по висоті та радіусу виливка і видимі неозброєним оком без хімічного травлення зразків. Хаотично розташовані по тілу усадкові раковини розміром до 5 мм також спостерігаються і в окремих виливках, виготовлених з використанням ливарних форм типу А.

Дані табл. 3 свідчать, що розплав алюмінієвої бронзи в ливарній формі типу С твердне швидше, ніж у ливарних формах інших типів. У зв'язку з цим для виготовлення ливарних форм та стрижнів за ПМЗ-процесом слід використовувати кварцовий пісок, плакований 1,5 % РС і просяяний через сито зі стороною

осередку 0,315 мм. У той же час залишок такого піску на ситі з осередком 0,315 мм можна використовувати як теплоізоляційну суміш.

Можливість використання ПРС з крупних конгломератів, структурованих за ПМЗ-процесом, в якості теплоізоляційної суміші оцінювали за результатами аналізу темплетів циліндричних виливків. При цьому, в одному випадку для виготовлення виливків використовували моноблочну ливарну форму типу С (див. рис. 1а), в іншому випадку – комбіновану форму, де для виливка використовували ливарну форму типу С, а для надливу – типу В (див. рис. 1б).

Темплети циліндричних виливків зі своїми надливами представлені на рис. 7а, б, а на рис. 7в – графік розподілу усадкової пористості за висотою виливків від їхнього торця (дільниця № 5 на рис. 7) до місця встановлення надливу (дільниця № 1 на рис. 7).

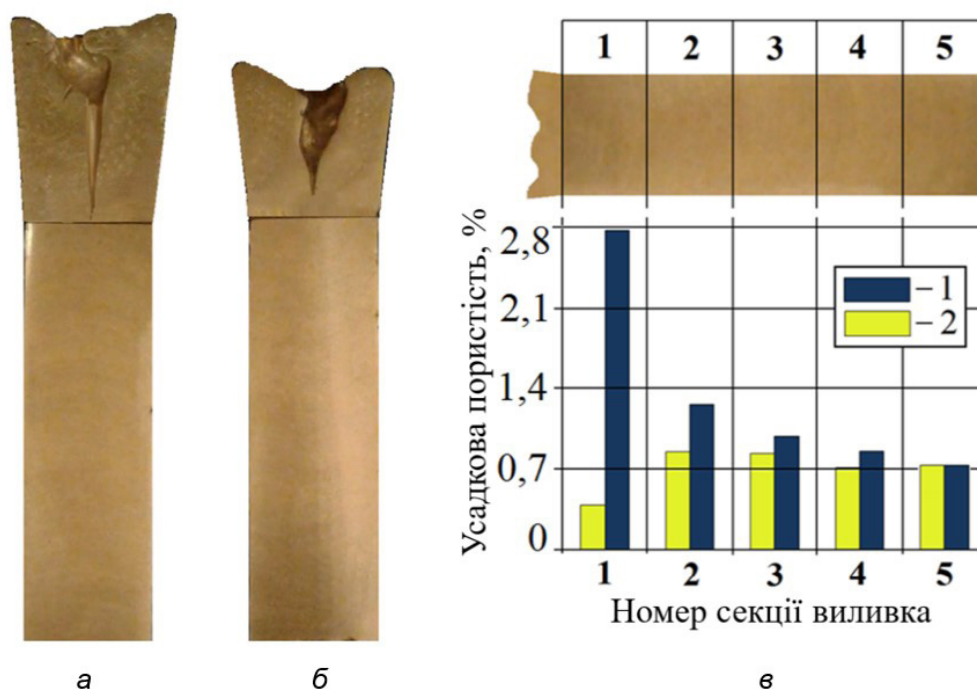


Рис. 7. Темплети циліндричних вилівоків з надливами, відлитих в моноблочну (а) і комбіновану (б) ливарні форми, та графік розподілу усадкової пористості вздовж циліндричних вилівоків (в): 1 – вилівок отримано в моноблочній ливарній формі; 2 – вилівок отримано в комбінованій ливарній формі

Таблиця 4

Коди сумішей плакованого кварцового піску

Код конгломератів суміші	Розміри конгломератів, мм		Вміст РС, яке було витрачено на плакування кварцового піску, %	
	< 0,315	≥ 0,315 ... < 0,63	0,5	2,5
F		+		+
M	+		+	
N	+			+

Таблиця 5

Реалізована план-матриця експерименту

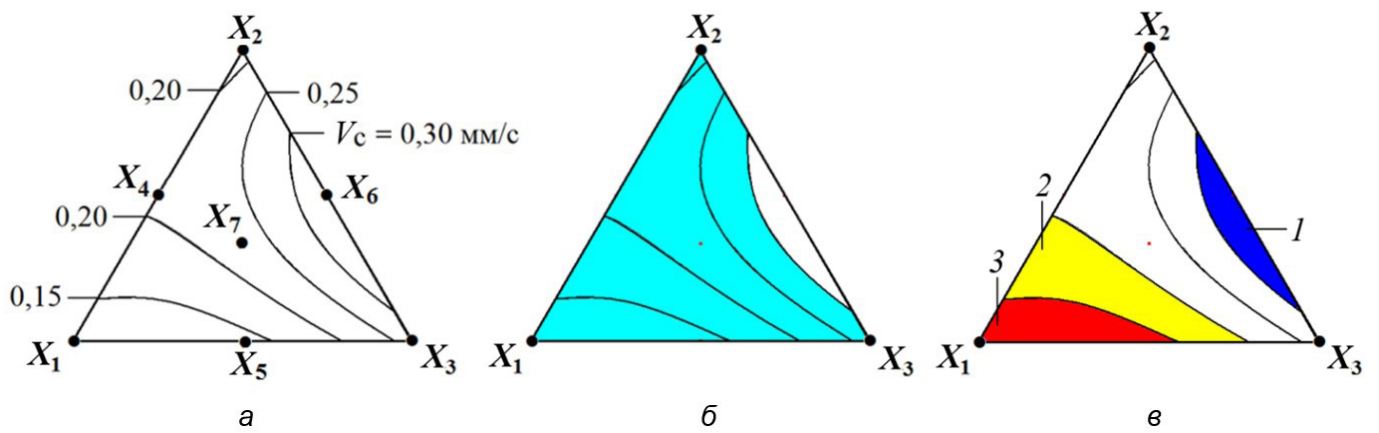
Код суміші	Відносна маса в суміші			Час затвердіння, с	$V_c$ , мм/с за формулою (2)
	F	M	N		
X1	1			147	0,109
X2		1		89	0,179
X3			1	60	0,267
X4	0,5	0,5		78	0,206
X5	0,5		0,5	119	0,134
X6		0,5	0,5	47	0,340
X7	0,33	0,33	0,33	71	0,226

Таблиця 6

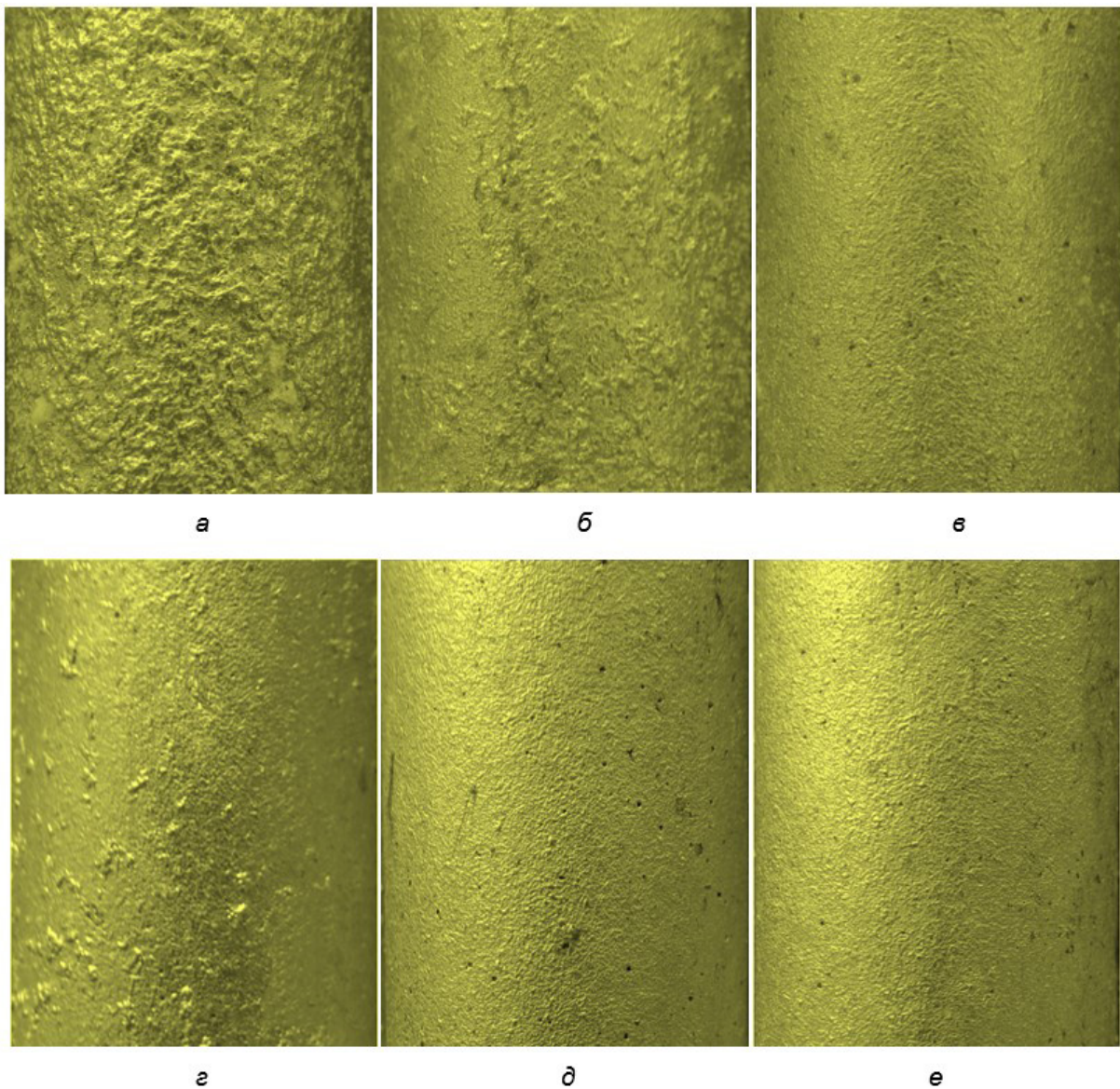
Коефіцієнти кореляції

Параметр	Коефіцієнти кореляції						
	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$
$V_c$	0,109	0,179	0,267	0,248	-0,216	0,468	-0,393





**Рис. 8.** Симплексний трикутник з ізолініями швидкості об'ємного затвердіння виливків (а), область складів сумішей (не зафарбована), що забезпечують швидкість затвердіння виливків більше 0,3 мм/с (б), області складів сумішей, які можуть бути рекомендовані для виготовлення виливків та їх ливникових систем в комбінованих ливарних формах (в): 1 – область складів сумішей, придатних для виливків; 2 – області складів сумішей, придатних для теплоізолюваних надливів з  $f = 1,5...2,0$ ; 3 – області складів сумішей, придатних для теплоізолюваних надливів з  $f \geq 2,0$



**Рис. 9.** Зовнішній вигляд поверхні виливків, одержаних у ливарних формах типу D (а, г), типу С (б, д), типу Е (в, е) при використанні моделі виливків з поліпропілену (а, б, в) та з гіпсу (г, д, е)

З аналізу рис. 7 випливає, що використання ПРС, структурованих за ПМЗ-процесом з конгломератів різних розмірів, дозволяє виготовляти комбіновані ливарні форми з утепленими надливами. Це, відповідно до експериментальних даних, не тільки дозволяє зменшити масу надливу на 17–22 %, але і об'єм усадкової пористості (з 1,3 до 0,7 %), і характер її розподілення у виливках (див. рис. 7в).

З метою розширення уявлень щодо можливостей ПРС, які структуровані за ПМЗ-процесом, провели оптимізацію їх хімічного та фракційного складів за планом Г. Шеффе. Коди сумішей з плакованого кварцового піску наведено в табл. 4, реалізована план-матриця експерименту – в табл. 5, коефіцієнти кореляції – в табл. 6.

За результатами досліджень та розрахунків, за формулою (3) побудовано симплексний трикутник з ізолініями швидкості об'ємного затвердіння виливків, на якому виділено область складів сумішей, що забезпечують швидкість затвердіння виливків більше 0,3 мм/с та області складів сумішей, які можуть бути рекомендовані для виготовлення виливків та їх ливникових систем в комбінованих ливарних формах, що надано на рис. 8.

З аналізу рис. 8 випливає, що потрібну швидкість об'ємного затвердіння ( $\geq 0,3$  мм/с) виливкам забезпечують ПРС, які виготовлені з кварцового піску, плакованого РС від 1 до 2 % за масою, та мають фракцію піщано-рідкоскляних конгломератів менше 0,315 мм (див. рис. 8б). При цьому, суміші, склад яких знаходиться у жовтій та червоній області (див. рис. 8в), можуть бути використано як теплоізоляційні у зв'язку з тим, що співвідношення швидкостей об'ємного затвердіння, що лежать в синій та жовтій зоні, складає  $f = 1,5 \dots 2,0$ , а в синій та червоній зоні –  $f \geq 2,0$ .

Якість поверхні виливків оцінювали візуально. Для цих досліджень використовували виливки з алюмінієвої бронзи, розплав якої заливали в ливарні форми типів D, C і E з перегрівом 80 °C. Відмінністю між отриманими виливками було і те, що для структурування плакованих пісків за ПМЗ-процесом моделі циліндричних виливків були виготовлені з поліпропілену або гіпсу Г22 і не мали ливарних ухилів. Зовнішній вигляд поверхні отриманих виливків зі збільшенням  $\times 1,5$  представлений на рис. 9.

З аналізу зображень на рис. 9 випливає, що зі збільшенням кількості РС, яке було використане на плакування кварцового піску, якість поверхні виливків покращується. При цьому, поверхневих дефектів на виливках, які виготовили з використанням гіпсової моделі, значно менше ніж у виливків, для яких використовували поліпропіленові моделі. Такі закономірності пояснюються тим, що зі збільшенням доли РС в ПРС її міцність, у тому числі і поверхнева, зростає і, відповідно, обсіпальність знижується. Тому під час протягування моделі поверхня такої структурованої суміші руйнується значно менше.

Щодо впливу матеріалу моделі, то тут значною мірою на обсіпальність поверхні ливарної форми при її протягуванні впливає величина коефіцієнту лінійного розширення (КЛР) матеріалу моделі. За результата-

ми досліджень встановлено, що поліпропілен та гіпс Г22, які були використані для виготовлення моделей виливків, в інтервалі від 20 до 130 °C мали КЛР, відповідно,  $17,2 \cdot 10^{-5}$  і  $2,4 \cdot 10^{-5}$  °C<sup>-1</sup>. Тобто, маючи однакову температуру нагрівання поліпропіленова модель на відміну від гіпсової моделі більш розширювалася, завдяки чому і чинила більший тиск на робочу поверхню ливарної форми, що відповідно позначилося на найбільш величині руйнування цієї поверхні.

**Обговорення результатів і перспективи досліджень.** З отриманих результатів досліджень випливає, що з числа досліджуваних в роботі факторів найбільш ефективним способом керування структурою використаної алюмінієвої бронзи (Cu+9,4%Al) є перегрів її розплаву під час плавки. При цьому, на макроструктуру виливків практично не впливає ні спосіб виготовлення, ні склад ливарної форми з ПРС. Таку закономірність можна пояснити тим, що ці параметри ПРС не змінюють величину теплоакуюлюючої здатності ливарної форми в тих межах, які б могли значною мірою вплинути на зміну макроструктури литої алюмінієвої бронзи.

Тим не менш, саме ці фактори є вирішальними не тільки для швидкості затвердіння розплаву та умов живлення виливка розплавом із надлива, а й відповідальні за якість поверхні виливків. За результатами виконаної оптимізації та отриманих даних можна однозначно казати, що структурування ПРС за ПМЗ-процесом дозволяє виготовляти як моноблочні, так і ефективні комбіновані форми без використання додаткових матеріалів, обмежуючись лише розсіюванням плакованого піску на фракції, розміри конгломератів яких менше та більше 0,315 мм. Ця обставина свідчить про певну технологічну «гнучкість» ПМЗ-процесу, що непридатна іншим способам структурування сумішей, та свідчить про перспективність та недослідженість багатьох можливостей даної технології.

## Висновки

1. Для поліпшення умов живлення виливків рекомендується ливникові ходи і порожнини виконувати в суміші піщано-рідкоскляних конгломератів з розмірами від 0,315 до 0,63 мм, а сам виливок – в суміші конгломератів з розмірами менше 0,315 мм.

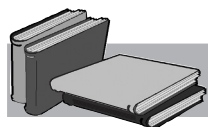
2. Якість поверхні ливарної форми, виготовленої за способом ПМЗ, і, відповідно, якість поверхні виливків підвищується зі збільшенням в суміші кількості рідкого скла (від 0,5 до 2,5 %), використаного для плакування кварцового піску, та зі зниженням коефіцієнта термічного лінійного розширення матеріалів постійних моделей виливків.

3. Для виготовлення ливарних форм за способом ПМЗ, що зазнають протяжки, кількість рідкого скла, використаного для плакування кварцового піску, має становити 1,5 %.

4. Зниження температури перегріву розплаву міді з 9,4 % Al зі 130 до 80 °C призводить до подрібнення макрозерна у виливках. Підвищення кількості рідкого скла, використаного для плакування кварцового скла, від 0,5 до 2,5 % практично не змінює розмір зерен у виливках.

5. Застосування способу ПМЗ для виготовлення піщано-рідкоскляних ливарних форм і стрижнів дозволяє ефективно керувати не тільки теплофізичними властивостями ливарних форм, але і якістю виливків, що виготовляються в них.

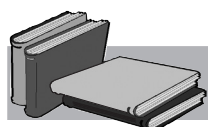
6. Суміші піщано-рідкоскляних конгломератів з розмірами від 0,315 до 0,63 мм, по відношенню до сумішей з конгломератів з розмірами менше 0,315 мм, які структуровані за ПМЗ-процесом, є теплоізоляційними.



## ЛІТЕРАТУРА

1. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Козишкурт Е.Н., Солоненко Л.И. Процессы кристаллизации и затвердевания отливок в разовых литейных формах. *Металл и литье Украины*. 2018. № 11–12. С. 54–61.
2. Мамисhev В.А., Шинский О.И., Соколовская Л.А. Пути ускорения процессов затвердевания и кристаллизации в песчаных формах. *Материалы XII Международной научно-практической конференции «Литье. Металлургия-2016»*. Запорожье, 2016. С. 159–161.
3. Деев В.Б., Пономарева К.В., Куценко А.И., Приходько О.Г., Сметанюк С.В. Влияние условий плавки алюминиевых сплавов на свойства и качество отливок, полученных по газифицируемым моделям. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017. № 4. С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-4-39-45>
4. Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю., Глушченков В.А., Черников Д.Г. Обработка расплавов магнитно-импульсными полями с целью управления структурой и свойствами промышленных силуминов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2016. № 2. С. 34–42. DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-34-42>
5. Ivanov Y.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Popova N.A., Konovalov S.V. Fatigue life of silumin treated with a high intensity pulsed electron beam. *J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015. Vol. 9. No. 5. P. 1056–1059.
6. Prusov E.S., Panfilov A.A. Properties of cast aluminum based composite alloys reinforced by endogenous and exogenous phases. *Russ. Metall.* 2011. № 7. P. 670–674.
7. Деев В.Б., Пономарева К.В., Приходько О.Г., Сметанюк С.В. Влияние температуры перегрева и заливки расплава на качество отливок из алюминиевых сплавов при литье по газифицируемым моделям. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017. № 3. С. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-65-71>
8. Баум Б.А. Влияние температурной обработки расплава на характеристики механических свойств металла. *Свойства сплавов в отливках: труды XVII совещания по теории литейных процессов*. Москва: Наука, 1975. С. 165–172.
9. Садовский В.Д. Структурная наследственность в стали. Москва: Металлургия, 1973. 208 с.
10. Баум Б.А. О взаимосвязи жидкого и твердого металлических состояний. *Расплавы*. 1988. Т. 2. С. 18–32.
11. Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах, 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение-1, 2005. 476 с.
12. Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С., Куценко А.И. Влияние теплофизических характеристик сплава и материала литейной формы на скорость затвердевания отливок. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 5. С. 327–334. DOI: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-327-334>
13. Илларионов И.Е., Стрельников И.А. Теплоизоляционные металлофосфатные смеси и методы их применения в литейном производстве. *Литейное производство*. 2017. № 1 (20). С. 27–29.
14. Назаратин В.В. Металлургия. Новые теплоизоляционные смеси. *Машиностроение*. 2008. № 5. С. 45–49.
15. Чернышов Е.А., Евлампиев А.А., Уваров Б.И., Королев А.В. Применение теплоизоляционных оболочек для прибылей фасонных отливок. *Труды седьмого съезда литейщиков России*. Том 1. Новосибирск: Изд. Москва, 2005. С. 146–149.
16. Напалков В.И., Фролов В.Ф., Баранов В.Н. Плавление и литье алюминиевых сплавов: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 716 с.

Надійшла 17.01.2022



## REFERENCES

1. Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Kozishkurt, E.N., Solonenko, L.I. (2018). Processes of crystallization and solidification of castings in single-casting molds. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 11–12, pp. 54–61 [in Russian].
2. Mamishev, V.A., Shinsky, O.I., Sokolovskaya, L.A. (2016). Ways to accelerate the processes of solidification and crystallization in sandy forms. *Materials of the XII International Scientific and Practical Conference "Casting. Metallurgy-2016"*. Zaporizhzhia, pp. 159–161 [in Russian].

3. Deev, V.B., Ponomareva, K.V., Kutsenko, A.I., Prikhodko, O.G., Smetanyuk, S.V. (2017). Influence of melting conditions of aluminum alloys on the properties and quality of castings obtained by lost foam casting. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*, no. 4, pp. 39–45, doi: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-4-39-45> [in Russian].
4. Nikitin, K.V., Nikitin, V.I., Timoshkin, I.Yu., Glushchenkov, V.A., Chernikov, D.G. (2016). Treatment of melts by pulsed magnetic fields to control the structure and properties of industrial silumins. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*, no. 2, pp. 34–42, doi: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-34-42> [in Russian].
5. Ivanov, Y.F., Alsaraeva, K.V., Gromov, V.E., Popova, N.A., Konovalov, S.V. (2015). Fatigue life of silumin treated with a high intensity pulsed electron beam. *J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, vol. 9, no. 5, pp. 1056–1059.
6. Prusov, E.S., Panfilov, A.A. (2011). Properties of cast aluminum based composite alloys reinforced by endogenous and exogenous phases. *Russ. Metall.*, no. 7, pp. 670–674.
7. Deev, V.B., Ponomareva, K.V., Prikhodko, O.G., Smetanyuk, S.V. (2017). The effect of overheating temperature and melt pouring temperature on the aluminum alloy casting quality in lost foam casting. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*, no. 3, pp. 65–71, doi: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-65-71> [in Russian].
8. Baum, B.A. (1975). Influence of temperature treatment of the melt on the characteristics of the mechanical properties of the metal. *Properties of alloys in castings: proceedings of the XVII meeting on the theory of casting processes*. Moscow: Nauka, pp. 165–172 [in Russian].
9. Sadovsky, V.D. (1973). Structural inheritance in steel. Moscow: Metallurgiya, 208 p. [in Russian].
10. Baum, B.A. (1988). On the relationship between liquid and solid metallic states. *Melts*, vol. 2, pp. 18–32 [in Russian].
11. Nikitin, V.I., Nikitin, K.V. (2005). Heredity in cast alloys, 2nd ed., Rev. and add. Moscow: Mashinostroenie-1, 476 p. [in Russian].
12. Prikhod'ko, O.G., Deev, V.B., Prusov, E.S., Kutsenko, A.I. (2020). Influence of thermophysical characteristics of alloy and mold material on castings solidification rate. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, vol. 63, no. 5, pp. 327–334, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-327-334> [in Russian].
13. Illarionov, I.E., Strelnikov, I.A. (2017). Heat-insulating metal-phosphate mixtures and methods of their application in foundry. *Foundry*, no. 1, pp. 27–29 [in Russian].
14. Nazaratin, V.V. (2008). Metallurgy. New thermal insulation mixtures. *Mechanical engineering*, no. 5, pp. 45–49 [in Russian].
15. Chernyshov, E.A., Evlampiev, A.A., Uvarov, B.I., Korolev, A.V. (2005). The use of heat-insulating shells for profiled castings. *Proceedings of the Seventh Congress of Russian Foundry Workers*, vol. 1. Novosibirsk: Ed. Moscow, pp. 146–149 [in Russian].
16. Napalkov, V.I., Frolov, V.F., Baranov, V.N. (2020). Melting and casting of aluminum alloys: monograph. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 716 p. [in Russian].

Received 17.01.2022

## Summary

**L.I. Solonenko**, PhD (Engin.), Associate Professor, Doctoral Student at the Department of Casting Production, e-mail: [solonenkoli14@gmail.com](mailto:solonenkoli14@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

**S.I. Repyakh**, Dr. Sci. (Engin.), Senior Researcher, Professor at the Department of Casting Production, e-mail: [123rs@ua.fm](mailto:123rs@ua.fm), <https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>

**K.I. Uzlov**, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor at the Department of Material Science, e-mail: [konst.uzlov@gmail.com](mailto:konst.uzlov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-0744-9890>

**V.F. Mazorchuk**, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Casting Production, e-mail: [mazorchukvf@gmail.com](mailto:mazorchukvf@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8512-0727>

*Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro, Ukraine)*

## Influence of mold and aluminum bronze melt overheating on castings structure and their surface quality

*This work is devoted to regularities of sand-sodium-silicate mixture (SSSM) mold, structured in steam-microwave environment (steam-microwave solidification method – SMS-process), and copper melt with 9.4 % Al overheating influence revealing on castings structure and surface quality.*

*In this investigation standard and generally accepted research methods and techniques have been used. Purpose of this work – influence regularities detection of mono-block and combined dry mixtures made and structured by SMS-process molds as*

well as castings melt overheating on products structure and their surface quality. Present research tasks have been determination of sodium silicate solute content and sand-sodium-silicate conglomerates SSSM size, aluminum bronze melt overheating temperature influence on castings structure, surface quality, solidification rate, and SSSM composition optimization due to sodium silicate solute content and its sand-sodium-silicate conglomerates size.

It has been found that mixtures structured by SMS-process with 1.5 % sodium silicate solute and conglomerates sizes up to 0.315 mm, allow to produce copper and bronze castings without burns (sodium cuprate). At the same time, SSSM with conglomerates sizes up to 0.315 mm and more than 0.315 mm has been recommended to be used, respectively, as molding mixture for casting and as thermal insulation mixture for its gating system.

With melt overheating increasing from 80 to 130 °C melt solidification time in molds, structured by SMS-process, increases. In this case, with overheating increasing, melt crystallization duration increases most intensively with overheating heat removal time from the melt slight increasing. Volumetric solidification rate dependence on sodium silicate solute content in SSSM in range from 0.5 to 2.5 % has an extremal character with maximum content of 1.5 % sodium silicate solute.

Castings macrostructure with changes of sodium silicate solute content in SSSM practically does not change, but transforms from fine-crystalline to large-crystalline with melt during pouring overheating temperature increasing. Based on research results, recommendations for SSSM structured by SMS-process implementation in castings manufacturing have been developed.

## Keywords

Mold, structure, structuring, sodium silicate solute, bronze, solidification rate, insulation mixture.