

Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І.

Оптимізація зернового складу піщано-рідкоскляних сумішей для структурування способом паро-мікрохвильового затвердіння

Solonenko L., Repiyakh S., Uzlov K.

Sand-sodium-silicate mixtures grains composition optimization for structuring by steam-microwave solidification method

Анотація. В роботі досліджено вплив розмірів піщано-рідкоскляних конгломератів суміші і вмісту в них натрієвого рідкого скла на основні фізико-технологічні показники формувальних та стрижневих сумішей структурованих в паро-мікрохвильовому середовищі, оптимізовано склад піщано-рідкоскляної суміші, структурованої в паро-мікрохвильовому середовищі (спосіб паро-мікрохвильового затвердіння – ПМЗ-процес).

В дослідженнях використано стандартні і загальноприйнятні методи і методики дослідження формувальних сумішей. Для виготовлення сумішей використовували: кварцовий пісок марки 1K₂O₂O₂; натрієве рідке скло з силікатним модулем 2,8...3,0 і питомою щільністю 1,42...1,44 г/см³. Плакування кварцового піску проводили 0,5 і 2,5 % рідкого скла (за масою, понад 100% піску). Піщано-рідкоскляні конгломерати розсіювали в ситах і для досліджень використовували конгломерати з розмірами менш 0,315 мм, а також з розмірами від 0,315 до 0,63 мм. Оптимізацію складу суміші проводили за результатами симплекс-планування та реалізації експерименту шляхом побудови симплекс-трикутників та накладення їх формативних зображень одне на одного із затемненими полями між ізолініями, які не відповідають необхідному рівню кожного з параметрів. Для побудови симплексних решіток використали модельза симплекс-решітчастим планом неповного куба в трійній системі Г. Шеффе.

Вперше встановлено вплив розмірів піщано-рідкоскляних конгломератів суміші і вмісту в них натрієвого рідкого скла на основні показники формувальних та стрижневих сумішей структурованих в паро-мікрохвильовому середовищі, а також оптимізовано їх склад.

Отримані дані будуть корисні при виготовленні ливарних форм та стрижнів, що структуровані за ПМЗ-процесом, які будуть мати прогнозовані показники властивостей, що відповідають допустимому їх рівню.

Оптимальний склад піщано-рідкоскляної суміші, що структурована за ПМЗ-процесом, є суміш кварцового піску, частина якого пройшла крізь сито з осередком 0,315 мм та мають вміст рідкого скла ($M_{SiO_2}=2,8...3,0$, $\rho_2=1,42...1,44$ г/см³) у кількості 1,5 % (за масою, поверх 100 % кварцового піску).

Ключові слова: пісок, рідке скло, паро-мікрохвильове затвердіння, оптимізація, конгломерати, міцність, газопроникність, обсипальність, щільність, стріла прогину, робота вибивання

Abstract. Mixture sizes of sand-sodium-silicate conglomerates and sodium silicate solute content in them influences on the basic physical and technological indicators of molding and core mixtures structured in steam-microwave environment have been investigated. Sand-sodium-silicate mixture structured by steam-microwave environment (steam-microwave solidification method – SMS-process) composition has been optimized.

Standard and generally accepted methods and techniques of molding mixtures investigation have been used in this study. For mixtures manufacturing have been used: quartz sand brand 1K₂O₂O₂; sodium silicate solute with silicate modulus of 2.8...3.0 and specific gravity of 1.42...1.44 g/cm³. Quartz sand cladding has been implemented with 0.5 and 2.5% sodium silicate solute (by weight, over 100% sand). Sand-sodium-silicate conglomerates have been scattered in sieves and conglomerates with sizes less than 0.315mm and with sizes from 0.315 to 0.63mm have been used for research. Mixture composition has been optimized according to results of simplex planning and experimental data by simplex triangles constructing and superimposing their formatted images on each other with darkened fields between isolines that do not meet of each parameters required level. To plot simplex lattices, model with simplex lattice plan of incomplete cube in Scheffe's triple system has been used.

For the first time, influence of mixture sand-sodium-silicate conglomerates sizes and sodium-silicate-solute content in them on basic indicators of mold and rod mixtures structured in steam-microwave environment has been established, and their composition has been optimized.

Data obtained will be useful in molds and rods structured by SMS-process manufacturing. They will have predictable indicators of properties that correspond to their allowable level.

Optimal composition of sand-sodium-silicate mixture, structured by SMS-process, is mixture of quartz sand, part of which passed through sieve with cell of 0.315 mm and have sodium silicate solute content ($M_{SiO_2}=2.8...3.0$, $\rho_2=1.42...1.44$ g/cm³) in amount of 1.5% (by weight, over 100% quartz sand).

Keywords. Sand, silicon silicate solute, steam-microwave solidification, optimization, conglomerates, strength, gas permeability, crushability, density, beam deflection, knockout energy.

Вступ. Розвиток техніки і технологій вимагає не тільки застосування деталей з сплавів з новим поєднанням або рівнем технологічних, споживчих і експлуатаційних властивостей, але і способів отримання з них литих заготовок – вилітків. Рішення подібних проблем стосується і процесів формоутворення в ливарному виробництві.

На сьогоднішній день екологічність, економічність і ефективність виробництва лиття – триєдина проблема (проблема «3-Е»), з якої випливає комплекс вимог до сучасних формувальних і стрижневих сумішей (ФСС) в числі яких:

- екологічні та санітарно-гігієнічні вимоги (відсутність виділення з ФСС і її компонентів токсич-

них і канцерогенних речовин в навколишнє середовище, а також різких і дратівливих запахів, і впливу на шкіру на всіх стадіях технологічного процесу видобутку мінералів або виробництва їх компонентів, підготування, застосування, регенерації і утилізації);

- *економічні вимоги* (вітчизняне великотоннажне виробництво компонентів сумішей, їх низька вартість, дешевизна виробництва ливарних форм і стрижнів (ЛФС), використання вітчизняного обладнання і недорогого оснащення, низька робота вибивання стрижнів з виливків, дешевизна або відсутність необхідності регенерації зернистого вогнетривкого компонента ФСС, можливість використання відпрацьованих ФСС, як сировини в інших процесах і/або виробках);

- *технічні вимоги* (керованість і передбачуваність результатів процесу структурування суміші, відносно висока швидкість структурування, достатня міцність, мінімальна крихкість, мінімальна робота ущільнення, низька гіроскопічність і обсипальність, висока газопроникність і низька газотвірна здатність і т.п.).

За характером застосування суміші поділяють на єдині, облицювальні і наповнювальні [1, 2]. Єдині суміші використовують для виготовлення ЛФС, практично, за будь-яких умов виробництва лиття, розмірів та маси виливків, облицювальні разом з наповнювальними – для ливарних форм в умовах одиничного і серійного виробництва лиття відповідального призначення і в випадках неможливості отримання якісних виливків в ливарних формах з єдиної суміші.

Рівень властивостей будь-яких ФСС призначають виходячи з металоємності ливарної форми, температури розплаву виливка, його розмірів, вимог до якості литва, особливостей виробництва виливків і т.д. Керують рівнем технологічних властивостей ФСС зміною вмісту в суміші сполучного матеріалу, способу його виготовлення або модифікування, підготування і використання, оптимізації фракційного складу ФСС, введення в суміш відповідних технологічних добавок тощо [3...7].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. В кожному виді лиття, виходячи з вимог до якості виливків, їх маси, типу сплаву і т.п., до ФСС пред'являють певні пріоритетні вимоги. Зокрема, для структурованих плакованих піщано-смоляних сумішей, які використовують у виробництві чавун-

них і сталевих виливків, рекомендована міцність при статичному вигині складає не менше 0,6...0,8 МПа, при розтягуванні в гарячому стані – не менше 0,24...0,28 МПа, при статичному вигині після термічного удару при 900 °С протягом 2 хв – не менше 0,18...0,24 МПа, а газотвірна здатність – не більше 32 см³/г [8]. Суттєвим недоліком ФСС з сполучним органічного походження є їх висока екологічна небезпечність сполучного матеріалу при транспортних та технологічних операціях, регенерації та утилізації ФСС [6]. Найбільш екологічно безпечним та перспективним у всіх відношеннях є використання в ФСС натрієвого рідкого скла (РС) [5].

Авторами роботи [9, 10] для виробництва литва рекомендовано використання холоднотвердіючих сумішей (ХТС) на основі РС, які б в структурованому стані мали межу міцності на стиск $\sigma_{ст}=3,4...3,9$ МПа, обсипальність $O_{с} \leq 0,05...0,1\%$, газопроникність – не менше 150...200 од і величину газотвірної здатності не більше 10...15 см³/г.

У той же час, автори роботи [3] відзначають, що єдині сирі піщано-глинисті суміші (ПГС) в залежності від способу їх ущільнення мають величину межі міцності на стиск від 0,04...0,06 МПа при ущільненні струшуванням до 0,10...0,22 МПа при пісчодувно-пресовому (безпочне формування) способі ущільнення. При цьому вологість таких сумішей становить 3,2...5,0 %, а газопроникність 90...140 од [11]. Істотними недоліками ПГС, що приводять до частого браку виливків по точності розмірів, засміченню і газовим раковинам, є їх низька міцність і висока газотвірна здатність при недостатній газопроникності і т.д.

Крихкість – важливий показник структурованої суміші, що зумовлює рівень її технологічності в частині збереження цілісності форм при їх протягуванні і стрижнів при їх вилученні з стрижневих ящиків. В даний час в якості критерію крихкості прийнято співвідношення межі міцності структурованої суміші на стиск до межі міцності при розтягуванні. У деяких роботах дослідники в якості запобіжного критерію крихкості використовують абсолютну або відносну величину прогину зразка довжиною 200 мм з поперечним перерізом 20×20 мм до його руйнування за триточковою схемою навантаження. Значення такого показника для деяких типів ХТС наведені в табл. 1.

Таблиця 1
Граничні деформації ХТС при вигині [3]

| Сполучна композиція | Стріла прогину, мм | |
|--|--------------------|----------------|
| | після 4 годин | після 24 годин |
| Смола БС-40 + H ₃ PO ₄ | 0,59 | 0,22 |
| Рідке скло + CO ₂ | 0,24 | 0,18 |
| Рідке скло + ефір | 0,24 | 0,10 |
| Рідке скло + шлак + ПАР (РСС) | 0,20 | 0,16 |
| MgO + H ₃ PO ₄ | 0,14 | 0,07 |
| MgO + H ₃ PO ₄ + ПВС | 0,32 | 0,23 |

Примітка. ПАР – поверхнево-активна речовина; ПВС –полівініловий спирт

Оцінюючи вибиваємість ПРС по їх залишковій міцності, автори роботи [3] відзначають, що для легкого вибивання залишкова міцність на стиск повинна бути менше ніж 1,5...2,0 МПа, що відповідає роботі вибивання на лабораторному копрі за методикою [4] приблизно 100 Дж.

Теплофізичні властивості структурованих ФСС багато в чому зумовлюють структуру і, відповідно, властивості практично будь-якої литої деталі. При цьому, підвищення механічних властивостей литих деталей реалізується, як правило, через подібнення зернистої структури їх сплаву. У свою чергу, з цією метою, за інших рівних умов, для виробництва виливків необхідно використовувати структуровані ФСС з найбільш можливою величиною теплоакумуючої здатності (b_2), яку, як пра-

вило, корегують величиною уявної щільності ФСС. У сумішей на основі кварцового піску та РС, як правило, величина $b_2 \approx 1260 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5} / (\text{м} \cdot \text{К})$ [3]. Виходячи з цього у таких сумішей величина їх уявної щільності становить не менше 1600 кг/м^3 .

Постановка проблеми. Виходячи з викладеного, для виробництва якісних литих деталей в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва виливків, відповідно до [4, 5, 8...16], придатність будь-якої структурованої ФСС оцінюють за наступними показниками: межа міцності при стиску, відносна величина стріли прогину до руйнування, обсипальність, газопроникність, уявна щільність, робота вибивання, граничні значення яких наведені в табл. 2

Таблиця 2

Граничні показники структурованої ФСС через 3 години після завершення її структурування

| Показник | Величина |
|---|-------------|
| Межа міцності на стиск, МПа | $\geq 2,0$ |
| Відносна величина стріли прогину до руйнування, % | $\geq 0,25$ |
| Обсипальність, % | $\leq 0,3$ |
| Газопроникність, од | ≥ 150 |
| Уявна щільність, кг/м^3 | ≥ 1600 |
| Робота вибивання, Дж | ≤ 100 |

Таким чином, аналіз робіт [4, 5, 8...16] показує, що найбільш повно вимогам «З-Е» відповідають єдині піщано-рідкоскляні суміші (ПРС) на основі кварцового піску і натрієвого РС. Однак на сьогоднішній день, дані про оптимальний склад ПРС, структурованих в паро-мікрохвильовій середовищі відсутні.

Мета і завдання досліджень. Мета дослідження – оптимізувати склад ПРС, структурованих в паро-мікрохвильовому середовищі (способом паро-мікрохвильового затвердіння). Завдання дослідження – встановити закономірності впливу розмірів піщано-рідкоскляних конгломератів суміші і вмісту в них РС на основні показники формувальних та стрижневих сумішей структурованих в паро-мікрохвильовому середовищі.

Матеріали та методи досліджень. В дослідженнях використовували: кварцовий пісок марки $1\text{K}_2\text{O}_2\text{O}_2$ з вмістом глини до 0,1% і середньою величиною зерен 0,23 мм; натрієве РС з силікатним модулем 2,8...3,0 і питомою щільністю 1,42...1,44 г/см^3 . Для плакування кварцового піску використовували 0,5 і 2,5% РС (за масою, понад 100% піску). Піщано-рідкоскляні конгломерати розсіювали в ситах і для досліджень їх використовували з розмірами менш 0,315 мм, а також з розмірами від 0,315 до 0,63 мм.

Плакування РС кварцового піску проводили наступним чином:

- після підготовки відповідних наважок кварцовий пісок змішували з РС в лабораторних бігунах;
- сушили на повітрі до сипучого стану і подрібнювали в лабораторних бігунах;

- сушили в мікрохвильовій печі протягом 3 хв в шарі до 30 мм;

- охолоджували до кімнатної температури і подрібнювали в лабораторних бігунах;

- розсіювали на ситах, розділяючи фракції піщано-рідкоскляних конгломератів з розмірами менш 0,315 мм, а також з розмірами більше 0,315 мм, але менш 0,63 мм.

Зважування проводили на електронних вагах з точністю 0,01 г. Розміри визначали штангенциркулем і індикатором годинникового типу з точністю 0,01 мм. Сушку і структурування ПРС мікрохвильовим випромінюванням проводили в мікрохвильовій печі частотою випромінювання 2,45 ГГц і потужністю магнетрону 900 Вт. Приготування сумішей здійснювали в лабораторних бігунах марки S1110. Кожен із зразків суміші структурували в паро-мікрохвильовому середовищі протягом 5 хв при вмісті води у водяному заряді – 1 г. Маса кожного структурованого зразка становила 400 г.

Коди конгломератів сумішей плакованого кварцового піску наведені в табл. 3.

Процедуру оптимізації проводили за результатами симплекс-планування та реалізації експерименту шляхом побудови симплекс-трикутників та накладення їх форматуваних зображень одне на одного із затемненими полями між ізолініями, які не відповідають необхідному рівню кожного з параметрів.

Для побудови симплексних решіток використали модельза симплекс-решітчастим планом неопвального куба в трійній системі Г. Шеффе та схемою на рис. 1 [17, 18].

Таблиця 3
Коди конгломератів 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 |
| A | | + | | + |
| B | + | | + | |
| C | + | | | + |

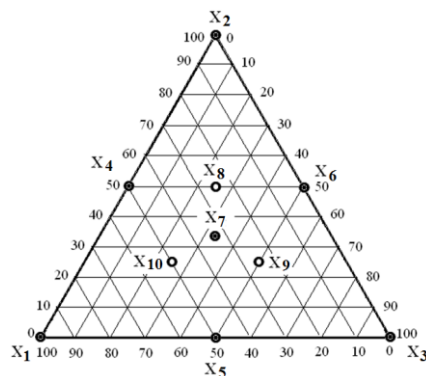


Рисунок 1. Схема плану проведення експериментів

Оскільки реалізація плану Г. Шеффе неповного куба в потрібній системі передбачає побудову моделі:

$$Y = \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \beta_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + \beta_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + \beta_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + \beta_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (1)$$

де Y – властивість матеріалу; β – коефіцієнт регресії; x – кількість матеріалу в суміші (за масою), то розрахунок коефіцієнтів регресії у формулі (1) проводили за такими формулами:

$$\beta_1 = \xi_1, \quad \beta_{ij} = 4 \cdot \xi_{ij} - 2 \cdot \xi_i - 2 \cdot \xi_j, \quad \beta_{123} = 27 \cdot \xi_{123} - 12 \cdot (\xi_{12} + \xi_{13} + \xi_{23}) + 3 \cdot (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3),$$

де ξ_i, ξ_j, ξ_{123} – результати дослідів в точках (див. рис. 1) симплексних решіток.

Оптимізацію ПРС, структурованої за ПМЗ-процесом, проводили за наступними параметрами: межа міцності при стиску, відносна величина стріли прогину до руйнування, обсипальність, газопроникність, уявна щільність, робота вибивання. Прийняті в дослідженнях вимоги до ПРС, які структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі, наведені в табл. 2.

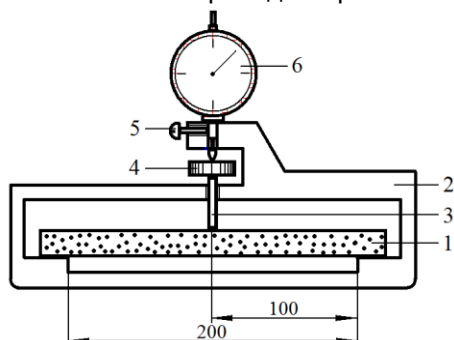
Міцність при стиску структурованих сумішей визначали відповідно до ГОСТ 23409.7-78 на зразках циліндричної форми $\varnothing 30 \times 30$ мм з використанням приладу марки LRu-2e, обсипальність – відповідно до ГОСТ 23409.9-78 з використанням приладу марки 04812, газопроникність – відповідно до ГОСТ 23409.6-78 на приладі марки 04315. При

цьому, для визначення обсипальності масу всіх зразків перед іспитом доводили до величини 160 г.

Уявну щільність структурованих зразків, що були підготовлені до руйнування при стиску, розраховували за результатами виміру їх розмірів та маси.

Руйнування зразків структурованих сумішей для визначення роботи їх вибивання проводили з використанням зразків без їх теплової обробки на лабораторному копрі марки 5033А.

Визначення стріли прогину зразків ($20 \times 20 \times 220$ мм) до їх руйнування проводили за триточковою схемою навантаження на приладі відповідно до схеми на рис. 2.



1 – випробуваний зразок ПРС; 2 – рама; 3 – рухливий шток вертикального ходу; 4 – вороток; 5 – фіксуючий гвинт; 6 – індикатор годинникового типу
Рисунок 2–Схема приладу для визначення стріли прогину зразків структурованих ПРС до їх руйнування затриточковою схемою навантаження

У відповідності зі схемою на рис. 2, для випробувань випробуваний зразок 1 встановлювали на опори рами приладу 2. Шляхом обертання воротка вводили в зіткнення з поверхнею зразка 1 рухомий шток 3, встановлювали на місці індикатора годинного типу 6 нульову позначку і здійснювали обертання воротка до руйнування під його штоком випробуваного зразка. Величина відхилення стрілки на індикаторі годинного типу відповідала абсолютній величині стріли прогину (f , мм) зразка до його руйнування. Відносну величину стріли прогину розраховували за формулою, %:

$$\Delta_{\epsilon} = 0,5 \cdot f \quad (2)$$

Для визначення величини роботи, витраченої на руйнування, зразок суміші $\varnothing 50 \times 40$ ммз натягом вкладали в сталеву гільзу відповідно до методики роботи [19], після чого у верхній поверхні зразка встановлювали сталевий бойок і на лабораторному копрі били по бойку до тих пір, поки він не проникне в зразок на глибину 40 мм. Роботу (A), витрачену на пробивання зразка на зазначену глибину, розраховують за формулою, Дж ($\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$):

$$A = n \cdot G \cdot h, \quad (3)$$

де n – число ударів по бойку до пробивання зразка на глибину 40 мм; G – маса падаючого на бойок вантажу в копрі; h – висота падіння вантажу на копрі.

Значення середньої арифметичної величини x розраховували за формулою:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N}{N}, \quad (4)$$

де $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ – розмір величин x ; N – число вимірів величини x .

Середнє квадратичне відхилення величини x розраховували за формулою [18, 20]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (5)$$

Стандартне відхилення величини (x) розраховували за формулою:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (6)$$

Мінімальна кількість випробовуваних зразків структурованих сумішей розраховували з використанням величини коефіцієнта варіації при заданій довірчій ймовірності з використанням номограми, на рис. 3 [21].

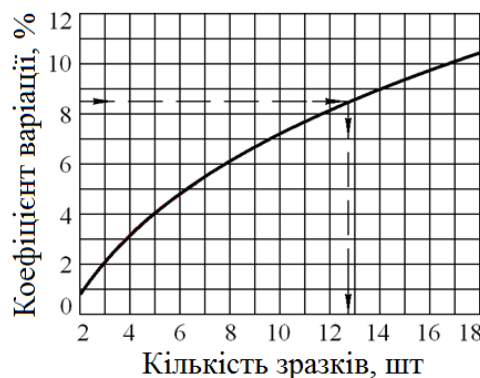


Рисунок 3 – Номограма для визначення мінімального числа випробовуваних зразків (довірча ймовірність – 0,95)

У дослідженнях величину довірчої ймовірності (у відсотках) прийняли рівній 95%. Коефіцієнт варіації розраховували за формулою, % [21]:

$$V = 100 \cdot \frac{\sigma}{\bar{x}}, \quad (7)$$

Результати досліджень. Оптимізацію зернового складу ПРС здійснювали для трьох видів конгломератів кварцового піску з РС, а саме:

A – конгломерати з 2,5% РС, що пройшли через сито з осередком 0,63 мм, але не пройшли сито з осередком 0,315 мм;

B – конгломерати з 0,5% РС, що пройшли через сито з осередком 0,315 мм;

C – конгломерати з 2,5% РС, що пройшли через сито з осередком 0,315 мм, що впливає з даних табл. 3.

Відповідно до прийнятої методики, симплексні решітки будували для межі міцності при стиску ($\sigma_{ст}$), обсіпальності (O_c), роботи вибивання при 20 °C (A), газопроникності (K), уявної щільності (ρ), відносної стріли прогину зразка балочного типу (Δ_{ϵ}).

Результати реалізованої план-матриці досліджень надані в табл. 4.

Коефіцієнти кореляції до формули (1) відповідних параметрів структурованої ПРС надано в табл. 5.

Таблиця 4
Реалізована план-матриця експерименту

| Код суміші | Відносна маса конгломератів в суміші | | | Параметри структурованої ПРС | | | | | |
|-----------------|--------------------------------------|------|------|------------------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| | A | B | C | Y ₁ | Y ₂ | Y ₃ | Y ₄ | Y ₅ | Y ₆ |
| | | | | σ _{СТ} , МПа | Ос, % | К, од | A ₂₀ , Дж | ρ, кг/м ³ | Δ _ε , % |
| X ₁ | 1 | | | 0,96 | 0,84 | 405 | 53 | 1224 | 0,13 |
| X ₂ | | 1 | | 0,74 | 1,22 | 152 | 6,1 | 1768 | 0,07 |
| X ₃ | | | 1 | 2,67 | 0,55 | 282 | 280 | 1710 | 0,275 |
| X ₄ | 0,5 | 0,5 | | 1,63 | 0,57 | 308 | 98 | 1392 | 0,195 |
| X ₅ | 0,5 | | 0,5 | 1,94 | 0,62 | 238 | 104 | 1675 | 0,195 |
| X ₆ | | 0,5 | 0,5 | 2,95 | 0,26 | 151 | 92 | 1727 | 0,32 |
| X ₇ | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 1,29 | 0,95 | 364 | 89 | 1465 | 0,16 |
| X ₈ | 0,25 | 0,50 | 0,25 | 1,37 | 0,88 | 328 | 79 | 1490 | 0,15 |
| X ₉ | 0,25 | 0,25 | 0,50 | 1,7 | 0,81 | 325 | 121 | 1555 | 0,19 |
| X ₁₀ | 0,50 | 0,25 | 0,25 | 1,15 | 0,94 | 380 | 81 | 1407 | 0,16 |

Таблиця 5
Коефіцієнти кореляції

| Параметр | Y _i | Коефіцієнти кореляції | | | | | | |
|-----------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | | b ₁ | b ₂ | b ₃ | b ₁₂ | b ₁₃ | b ₂₃ | b ₁₂₃ |
| σ _{СТ} | Y ₁ | 0,96 | 0,74 | 2,67 | 3,12 | 0,50 | 4,98 | -30,3 |
| Ос | Y ₂ | 0,84 | 1,22 | 0,55 | -1,84 | -0,30 | -2,50 | 16,08 |
| К | Y ₃ | 405 | 152 | 282 | 118 | -442 | -264 | 3981 |
| A | Y ₄ | 53,0 | 6,1 | 280,0 | 273,8 | -246,0 | -204,2 | -119,7 |
| ρ ₂ | Y ₅ | 1224 | 1768 | 1710 | -416 | 832 | -48 | -3867 |
| Δ _ε | Y ₆ | 0,13 | 0,07 | 0,275 | 0,38 | -0,03 | 0,59 | -2,775 |

Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і затемнені поля неприпустимих значень (б) досліджуваних параметрів структурованої ПРС представлені на рис. 4...9.

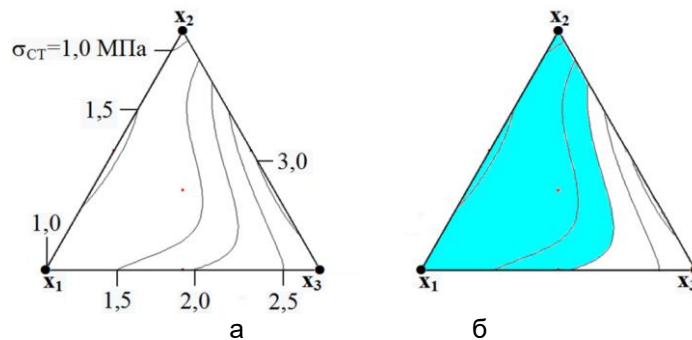


Рисунок 4 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і затемнені поля неприпустимих значень (б) межі міцності при стиску структурованої ПРС

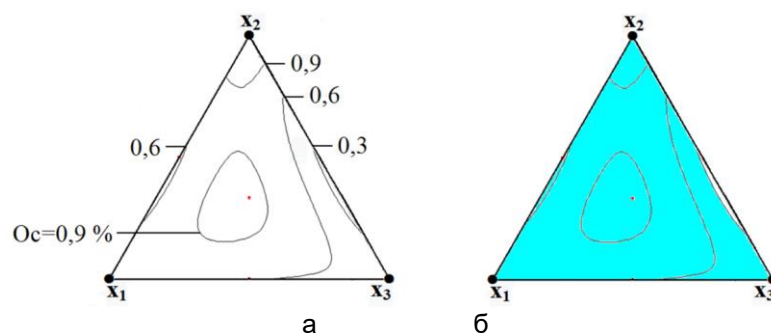


Рисунок 5 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і затемнені поля неприпустимих значень (б) обсіпальності структурованої ПРС

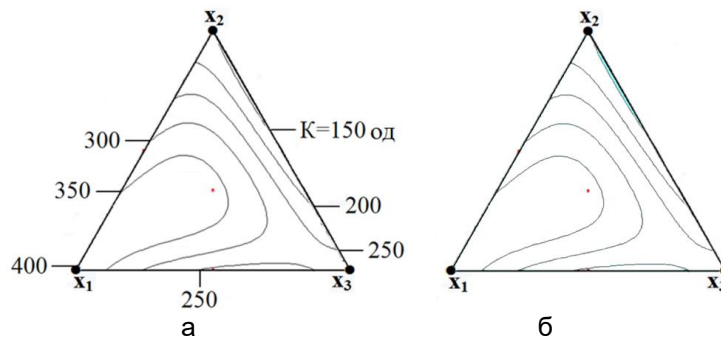


Рисунок 6 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і затемнені поля неприпустимих значень (б) газопроникності структурованої ПРС

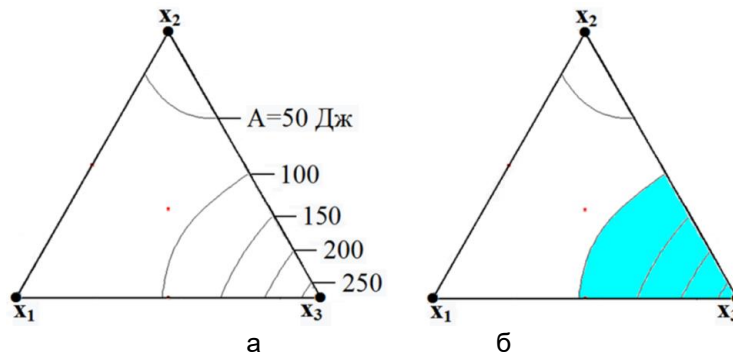


Рисунок 7 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і затемнені поля неприпустимих значень (б) роботи вибивання при 20 °С структурованої ПРС

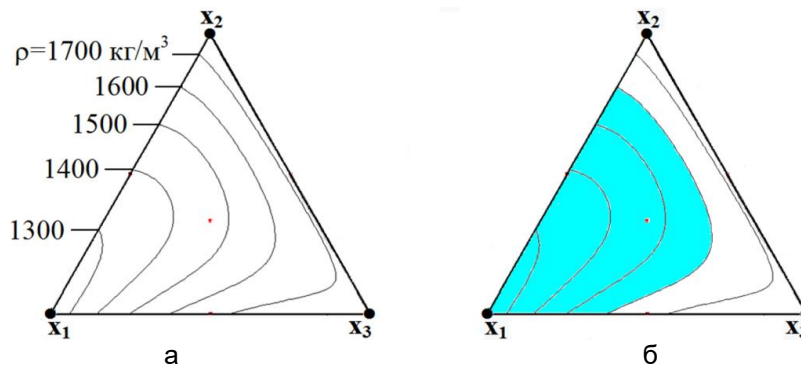


Рисунок 8 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і затемнені поля неприпустимих значень (б) уявної щільності структурованої ПРС

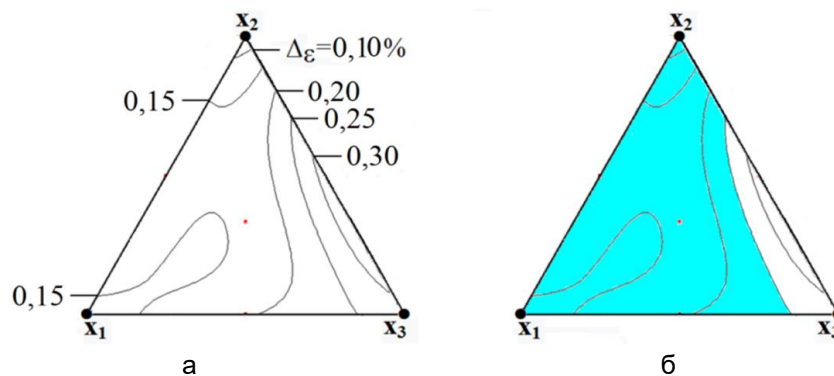


Рисунок 9 – Ізолінії на симплексному трикутнику (а) і затемнені поля неприпустимих значень (б) відносної стріли прогину зразка балочного типу структурованої ПРС

Результат накладання симплексних решіток (крапка fна зображенні) та зображення ключа в концентраційній сітці симплекс-решітки представлений на рис. 10.

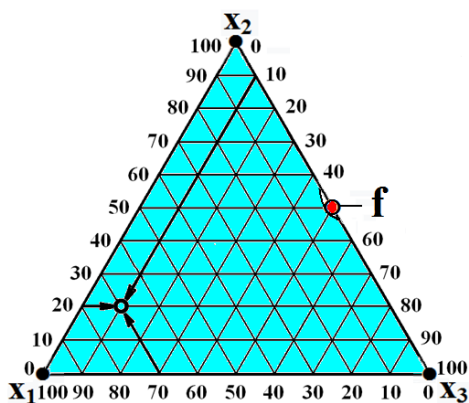


Рисунок10 – Оптимальна область (точка f) в концентраційній сітці симплекс-решітки і її концентраційний ключ

Згідно із зображенням на рис. 10 оптимальним складом ПРС, що структурована за ПМЗ-процесом, є суміш кварцового піску, частина якого пройшла крізь сито з осередком 0,315 мм та мають вміст PC ($M_{SiO_2}=2,8\dots3,0$, $\rho_2=1,42\dots1,44$ г/см³) у кількості 1,5% (за масою, понад 100% піску).

Виходячи з того, що суміші з постійною величиною PC, використаного для плакування кварцового піску, можна готувати з пісків з різним вмістом PC – встановили залежності межі міцності при стиску від співвідношення маси PC в наважках однакової маси плакованого кварцового піску при загальній масі PC (m_{PC}) 0,5, 1,5 і 2,5 % (за масою), що наведено в табл. 6 і представлено на рис. 11.

Таблиця 6

Маса наважки та маса PC (% за масою), яке було використано для плакування наважок кварцового піску у зразках

| Позначення наважки | Маса наважки, г | Маса PC (% за масою), яке було використано для плакування наважок кварцового піску у зразках: | | | | |
|----------------------------------|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Загальна маса PC в суміші – 0,5% | | | | | | |
| PC ₁ | 200 | 0,000 | 0,083 | 0,167 | 0,333 | 0,500 |
| PC ₂ | 200 | 1,000 | 0,917 | 0,833 | 0,667 | 0,500 |
| $\Delta_{PC}=PC_1/PC_2$ | | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 |
| Загальна маса PC в суміші – 1,5% | | | | | | |
| PC ₁ | 200 | 0,00 | 0,25 | 0,50 | 1,00 | 1,5 |
| PC ₂ | 200 | 3,00 | 2,75 | 2,50 | 2,00 | 1,5 |
| $\Delta_{PC}=PC_1/PC_2$ | | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 |
| Загальна маса PC в суміші – 2,5% | | | | | | |
| PC ₁ | 200 | 0,000 | 0,417 | 0,833 | 1,667 | 2,500 |
| PC ₂ | 200 | 5,000 | 4,583 | 4,167 | 3,333 | 2,500 |
| $\Delta_{PC}=PC_1/PC_2$ | | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 |

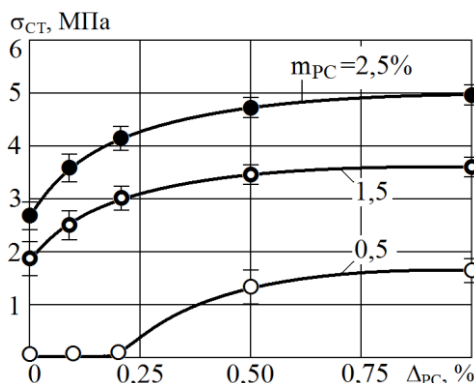


Рисунок 11 – Залежність межі міцності при стиску від співвідношення маси PC в наважках однакової маси плакованого кварцового піску при загальній масі PC (m_{PC}) 0,5, 1,5 і 2,5 % (за масою)

З аналізу ходу залежностей на рис. 11 випливає, що найбільшою міцністю володіють структуровані ПРС, у яких фракційний склад представлений конгломератами з однаковим змістом РС. При цьому, міцність при стисненні структурованих ПРС збільшується з підвищенням маси РС, використаного на плакування кварцового піску.

Авторами роботи [22] запропоновано ряд функціональних залежностей для різних сумішей, у числі яких і ПРС, а саме:

$$O_c = Z_0 \cdot \rho^3 \cdot l_c \cdot \frac{K}{\sigma_{ст}}, \quad (8)$$

де $l_c = 0,05$ м.

Таблиця 7

Похибка розрахунків

| Код суміші | O _c , % | | | A, Дж | | | Δ _ε , % | | |
|-----------------|--------------------|--------------|------------|-------|--------------|------------|--------------------|---------------|------------|
| | експ. | розр. за (8) | похибка, % | експ. | розр. за (9) | похибка, % | експ. | розр. за (10) | похибка, % |
| X ₁ | 0,84 | 0,81 | 3,3 | 53 | 52 | 2,3 | 0,13 | 0,135 | -3,8 |
| X ₂ | 1,22 | 1,19 | 2,3 | 6,1 | 6,3 | -2,7 | 0,07 | 0,072 | -2,9 |
| X ₃ | 0,55 | 0,55 | -0,8 | 280 | 271 | 3,1 | 0,275 | 0,285 | -3,6 |
| X ₄ | 0,57 | 0,54 | 6,1 | 98 | 98 | -0,2 | 0,195 | 0,2 | -2,6 |
| X ₅ | 0,62 | 0,61 | 2,4 | 104 | 100 | 3,8 | 0,195 | 0,205 | -5,1 |
| X ₆ | 0,26 | 0,28 | -6,5 | 92 | 96 | -4,3 | 0,32 | 0,33 | -3,1 |
| X ₇ | 0,95 | 0,93 | 1,9 | 89 | 90 | -1,6 | 0,16 | 0,155 | 3,1 |
| X ₈ | 0,88 | 0,83 | 5,5 | 79 | 84 | -6,3 | 0,15 | 0,15 | 0,0 |
| X ₉ | 0,81 | 0,75 | 6,8 | 121 | 133 | -9,9 | 0,19 | 0,18 | 5,3 |
| X ₁₀ | 0,94 | 0,97 | -2,8 | 81 | 75 | 7,4 | 0,16 | 0,15 | 6,3 |

З аналізу даних табл. 7 випливає, що величина відносної похибки між експериментальними і розрахунковими даними за величиною обсіпальності, роботи вибивання та відносної величини стріли прогину структурованих сумішей при, відповідно, $Z_0=21 \cdot 10^{-10}$, $Z_A=56 \cdot 10^{-7}$ і $Z_\epsilon=19 \cdot 10^{-10}$ не перевищує 10%. Це є підставою вважати, що реалізація плану матриці за схемою неповного третій симплекс планування вірно і рекомендувати отримані дані в процесах моделювання та прогнозування властивостей ПРС, структурованих за способом ПМЗ.

Обговорення результатів. В результаті проведених досліджень встановлено, що міцність структурованої суміші при стиску (див. рис. 4) та робота вибивання (див. рис. 7) зростає зі зменшенням розмірів використаних в її складі піщано-рідкоскляних конгломератів і збільшення маси в них РС. Ця закономірність пояснюється тим, що з підвищенням кількості РС зростає поперечний переріз манжет з силікату натрію між піщинками. З іншого боку, обмежений час паро-мікрохвильового впливу на великі конгломерати не забезпечує істотного збільшення в структурованій суміші числа міжзеренних контактів. Як результат зі збільшенням розмірів вихідних конгломератів в суміші зменшується не тільки її міцність, але уявна щільність

$$A = Z_A \cdot l_A \cdot \rho \cdot K^2 \cdot \sigma^2, \quad (9)$$

де $l_A = 0,05$ м.

$$\Delta_\epsilon = 100 \cdot \frac{\epsilon}{l} = Z_\epsilon \cdot \rho^2 \cdot \frac{K}{O_c}, \quad (10)$$

де $l_\epsilon = 0,2$ м, використовуючи експериментальні дані табл. 4 та формули (8)...(10) при значеннях $Z_0=21 \cdot 10^{-12}$, $Z_A=56 \cdot 10^{-7}$, $Z_\epsilon=19 \cdot 10^{-10}$ розрахували похибки між експериментальними та розрахунковими даними. Результати визначення похибок наведено в табл. 7.

і обсіпальність, про що свідчить хід ізоліній в симплексному трикутнику на рис. 8 і 5 відповідно.

Проте зі збільшенням розмірів конгломератів, використаних в складі сумішей, і збільшення маси в них РС зростає газопроникність, про що свідчить хід ізоліній в симплексному трикутнику на рис. 6. Це пов'язано зі зменшенням щільності суміші та збільшенням простору між конгломератами – розмірів перетинів капілярних каналів. В свою чергу з цими ж показниками зменшується стріла прогину (див. рис. 9), так як структурована суміш стає менш міцною і більш крихкою.

Найбільшою міцністю володіють структуровані ПРС, у яких фракційний склад представлений конгломератами з однаковим вмістом РС. При цьому, міцність при стиску структурованих ПРС збільшується з підвищенням маси РС, використаного на плакування кварцового піску, про що свідчать хід кривих на рис. 11. Тобто зі збільшенням вмісту РС в суміші зростає поперечний переріз манжет з силікату натрію між піщинками та, відповідно, збільшується міцність структурованої суміші. Тобто, такий комплексний підхід щодо визначення відповідних закономірностей дозволив оптимізувати склад ПРС за величиною розмірів піщано-рідкоскляних конгломератів та вмісту в них РС в межах змін технологічних параметрів які були прийняті для структуровання сумішей.

Крім того, як витікає з даних табл. 7, величина відносної похибки між експериментальними і розрахунковими за формулами (8)...(10) даними не перевищує 10 %. Така відносно невелика похибка свідчить про те, що використані функціональні залежності адекватно описують взаємозв'язок між фізичними та технологічними параметрами, що входять до їх складу, а результати розрахунку за цими формулами можливо рекомендувати для моделювання та прогнозування властивостей ПРС, структурованих за способом ПМЗ в умовах «дрейфу» області оптимуму при зміні умов виготовлення ЛФС.

Висновки.

Оптимальний склад піщано-рідкоскляної суміші, що була структурована впродовж 5 хвилин за процесом паро-мікрохвильового затвердіння в печі з потужністю магнетрону 900 Вт, є суха сипуча суміш кварцового піску з натрієвим рідким склом, яка пройшла крізь сито з осередком 0,315 мм та має вміст натрієвого рідкого скла ($M_{SiO_2}=2,8...3,0$, $\rho_2=1,42...1,44$ г/см³) у кількості 1,5 % (за масою, понад 100 % кварцового піску).

Оскільки величина відносної похибки між експериментальними і розрахунковими даними за величиною обсіпальності, роботи вибивання та відносної величини стріли прогину структурованих сумішей при, відповідно, $Z_0=21 \cdot 10^{-10}$, $Z_A=56 \cdot 10^{-7}$ і $Z_\varepsilon=19 \cdot 10^{-10}$ не перевищує 10 %, функціональні залежності, що надані в роботі, рекомендовано для використання при моделюванні та прогнозуванні властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих за способом паро-мікрохвильового затвердіння в тому числі в умовах «дрейфу» області оптимуму при зміні відповідних умов виготовлення ливарних форм та стрижнів.

Міцність на стиск, уявна щільність, стріла прогину та робота вибивання піщано-рідкоскляної суміші структурованої за процесом паро-мікрохвильового затвердіння зростають, а обсіпальність знижується зі зменшенням розмірів використаних в її складі піщано-рідкоскляних конгломератів і збільшення маси в них натрієвого рідкого скла. В той же час, газопроникність сумішей збільшується з підвищенням розмірів конгломератів і вмісту в них рідкого скла.

Бібліографічний опис

1. Емельянов А.П. Технология литейной формы. М: Машиностроение, 1979. 240 с.
2. Степанов Ю.А., Семенов В.И. Формовочные материалы. М.: Машиностроение, 1969. 157 с.
3. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. М. Машиностроение, 1989. 288 с.
4. Лясс А. М. Быстротвердеющие формовочные смеси. М.: Машиностроение, 1965. 332 с.
5. Ткаченко С.С., Колодий Г.А., Знаменский Л.Г., Ермоленко А.А. Холодно-твердеющие смеси на неорганическом связующем: состояние и перспективы развития (неорганика против органики). *Литье и металлургия*. 2018. №2 (91). С. 16-22.
6. Пономаренко О.И., Евтушенко Н.С. Технологический процесс получения холодно-твердеющих смесей на основе олигофурфурилоксисилановых связующих. *Литье и металлургия*. 2016. 2 (83). С. 31-38
7. Каратеев А.М., Пономаренко О.И., Берлизова Т.В., Калкаманова О.С., Юрченко В.В. Опыт и перспективы использования смесей на основе жидкого стекла с эфирными отвердителями. *Металл и литье Украины*. 2018. № 3-4 (298-299). С. 40-46.
8. Глыбов Д.С., Выков П.Г., Гуляев Б.Б. Применение плакированных песчано-смоляных смесей в литейном производстве. *Литейное производство*. 1987. № 1. С. 8-9.
9. Жуковский С.С. Холоднотвердеющие смеси. *Литейное производство*. 1980. № 2. С. 20-22.
10. Жуковский С.С., Лясс А.М. Формы и стержни из холоднотвердеющих смесей. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.
11. Кукуй Д.М., Скворцов В.А., Андрианов Н.В. Теория и технология литейного производства: учебник. В 2-х ч. Ч. 1. Формовочные материалы и смеси. Минск: Новое знание; М.: ИНФРАМ, 2011. 384с.
12. Великанов Г.Ф., Примак И.Н., Бречко А.А. Прочность форм из ХТС. *Литейное производство*. 1988. № 1. С. 8-10.
13. Жуковский С.С., Борсук П.А. Перспективы применения смесей с жидким стеклом в литейном производстве. *Литейное производство*. 1983. № 1. С. 12-14.
14. Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.
15. Тепляков С.Д., Сафронов В.А., Задов А.Е., Ольшовски Т., Вилкощ Б. Отверждение ХТС с жидкими отвердителями на основе ацетатов этиленгликоля. *Литейное производство*. 1990. № 1. С. 11-12.
16. Жуковский С.С., Сафронов В.А., Тепляков С.Д., Задов А.Е., Муравьева Т.С. Методы регулирования остаточной прочности жидкостекольных ХТС с ацетатами этиленгликоля. *Литейное производство*. 1990. № 4. С. 12-14.
17. Афонин Ю.С., Дубровин В.И. Моделирование ставов смесей методом симплексных решёток. *Радиоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2004. №2. С. 60-63.

18. Бела́й Г.Е., Дембовский В.В., Соценко О.В. Организация металлургического эксперимента: учеб. пособие. Изд. 2-е, доп. СПб.: СЗТУ, 2010. 225 с.
19. Лясс А.М. Быстротвердеющие формовочные смеси. М.: Машиностроение, 1965. 330 с.
20. Грачёв Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования эксперимента. М.: Деллипринт. 2005. 296 с.
21. Репях С.И., Соценко О.В., Жегур А.А. О типичных ошибках при обработке экспериментальных данных (памятка для начинающих исследователей). *Литьё Украины*. 2011. №11. С. 18–30.
22. Солоненко Л.І., Білий О.П., Узлов К.І. Функціональні залежності між властивостями зразків з структурованих формувальних і стрижневих сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6. С. 93-100.

Reference

1. Emelyanov A.P. Casting mold technology. M: Mechanical Engineering, 1979.240 p.
2. Stepanov Yu.A., Semenov V.I. Molding materials. Moscow: Mashinostroenie, 1969.157 p.
3. Zhukovsky S.S. Mold strength. M. Mechanical Engineering, 1989.288 p.
4. Lyass AM Fast-hardening molding mixtures. Moscow: Mashinostroenie, 1965.332 p.
5. Tkachenko S.S., Kolodiy G.A., Znamensky L.G., Ermolenko A.A. Cold-hardening mixtures on an inorganic binder: state and development prospects (inorganic versus organic). *Casting and metallurgy*. 2018. № 2 (91). Pp. 16-22.
6. Ponomarenko OI, Yevtushenko N.S. Technological process for obtaining cold-hardening mixtures based on oligofurfuryloxysilaxane binders. *Casting and metallurgy*. 2016. №2 (83). Pp. 31-38
7. Karateev A.M., Ponomarenko O.I., Berlizeva T.V., Kalkamanova O.S., Yurchenko V.V. Experience and prospects of using mixtures based on liquid glass with ether hardeners. *Metal and casting of Ukraine*. 2018. № 3-4 (298-299). Pp. 40-46.
8. Glybov D.S., Vykov P.G., Gulyaev B.B. Application of clad sand-resin mixtures in foundry. *Foundry*. 1987. № 1. Pp. 8-9.
9. Zhukovsky S.S. Cold hardening mixtures. *Foundry*. 1980. № 2. Pp. 20-22.
10. Zhukovsky S.S., Lyass A.M. Forms and rods of cold-hardening mixtures. M.: Mashinostroenie, 1978.224 p.
11. Kukui D.M., Skvortsov V.A., Andrianov N.V. Theory and technology of foundry production: textbook. In 2 hours Part 1. Molding materials and mixtures. Minsk: New knowledge; M.: INFRAM, 2011.384 p.
12. Giants G.F., Primak I.N., Brechko A.A. Durability of XTS forms. *Foundry*. 1988. № 1. Pp. 8-10.
13. Zhukovsky S.S., Borsuk P.A. Prospects for the use of mixtures with liquid glass in foundry. *Foundry*. 1983. № 1. Pp. 12-14.
14. Boldin A.N., Davydov N.I., Zhukovsky S.S. Foundry molding materials. Molding, core mixtures and coatings: a reference book. M.: Mashinostroenie, 2006.507 p.
15. Teplyakov S.D., Safronov V.A., Zadov A.E., Olshovski T., Vilkosch B. Curing of cold-bonded mixtures with liquid hardeners based on ethylene glycol acetates. *Foundry*. 1990. № 1. Pp. 11-12.
16. Zhukovsky S.S., Safronov V.A., Teplyakov S.D., Zadov A.E., Muravyova T.S. Methods for regulating the residual strength of liquid-glass CTS with ethylene glycol acetates. *Foundry*. 1990. № 4. Pp. 12-14.
17. AfoninYu.S., Dubrovin V.I. Modeling of mixture stakes by the method of simplex lattices. *Radioelektronika.Informatics.Management*. 2004. № 2. Pp. 60–63.
18. Belay G.E., Dembovskiy V.V., Sotsenko O.V. Organization of a metallurgical experiment: textbook. allowance. Ed. 2nd, add. SPb .: SZTU, 2010. 225 p.
19. Lyass A.M. Fast-setting molding sands. Moscow: Mashinostroenie, 1965. 330 p.
20. GrachevYu.P., PlaksinYu.M. Mathematical methods for planning an experiment.M .: DeLi print. 2005. 296 p.
21. Repyakh S.I., Sotsenko O.V., Zhegur A.A. About typical mistakes in processing experimental data (memo for novice researchers).*Casting of Ukraine*. 2011. № 11. Pp. 18-30.
22. Solonenko L.I., Bilyi O.P., Uzlov K.I. Functional relationships between the properties of samples of structured molding and core mixtures. *Theory and practice of metallurgy*. 2018. № 6. Pp. 93-100.

Отримано/Received: 16.02.2021