

УДК 621.74.04

<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.11>

Реп'ях С.І., Солоненко Л.І., Білий О.П., Усенко Р.В., Узлов К.І.

Властивості і структури компонентів піщано-рідкоскляних формувальних сумішей

Repyakh S., Solonenko L., Bilyi O., Usenko R., Uzlov K.

Properties and structures of Sodium silicate – sand mixtures components

Статтю присвячено питанням виявлення закономірностей структурування піщано-рідкоскляних сумішей, вивченню можливості прогнозування і зміни їх властивостей. Дослідження виконані з використанням кварцового піску та рідкого скла, а також кварцового піску, плакованого рідким склом. Встановлено, що сипкість піску не залежить від розмірів його частинок і найбільшу величину набуває при вмісті вільної води (вологи) менше 0,2% за масою, уявна щільність чистого і плакованого піску, ущільненого вібрацією, адитивна пайовому масовому вмісту в ньому нормованих фракцій піщинок і зростає від 1100 до 1900 кг/м³ зі зменшенням середнього розміру його зерен від 0,81 до 0,16 мм і зі збільшенням модуля їх дрібноти від 20 до 60. За експериментальними даними розроблено аналітичну залежність між вмістом в рідкому склі силікату натрію і питомою щільністю рідкого скла, проведена оцінка впливу способу сушіння рідкого скла на залишковий вміст в ньому води. Показано, що в залежності від кількості рідкого скла в суміші, його фізичного стану до моменту початку структурування суміші і способу його затвердіння структура затверділого рідкого скла в структурованій піщано-рідкоскляній суміші може змінюватися від щільно-орієнтованої до пінно-дезорієнтованої, містити і не містити залишкову воду. Використання і облік отриманих даних дозволить не тільки скоротити витрати на розробку нових піщано-рідкоскляних сумішей, підвищити точність прогнозування їх властивостей, але і відкриває новий напрям в способах виготовлення з них ливарних форм і стрижнів.

Ключові слова: рідке скло, пісок, вода, сушка, випаровування, випромінювання, пара

Article is devoted to the questions of structuring regularities detection in sodium silicate – sand mixtures and possibility of forecasting and changing their properties determination. Studies have been performed using quartz sand and sodium silicate solute, and also quartz sand placket with sodium silicate solute. It has been discovered that sand flow ability does not depend on the size of its particles, and the largest value acquires with the content of free water (moisture) less than 0.2% by weight. It has been established that apparent density of rare and placket sand, compacted by vibration, is additive to fractional mass content in it of particles normalized fractions and increases from 1100 to 1900 kg/m³ with average size of its grains decreasing from 0.82 to 0.16 mm and with their fineness modulus increasing from 20 to 60. According to experimental data, analytical relationship between content of sodium silicate solute and specific density of sodium silicate solute has been elaborated. Estimation of sodium silicate solute drying method influence on residual water content in it has been realized. It has been shown that depending on sodium silicate solute amount in mixture, its physical state up to the time of mixture structuring beginning and method of solidification, the structure of solidified sodium silicate solute in structured sodium silicate – sand mixture may vary from dense-oriented to foam-disoriented, contain or not contain residual water. Obtained data using and recording will allow not only reduce the cost of new sodium silicate – sand mixtures developing, increase prediction of their properties accuracy, but also open a new direction for methods of their implementation in foundry molds and rods production.

Keywords: sodium silicate solute, sand, water, drying, evaporation, radiation, vapor

Вступ. Інтенсивне забруднення навколишнього середовища відходами техногенного походження стало поштовхом, який привів до початку зміни клімату в планетарному масштабі. Тому, актуальність питання екологічної безпеки будь-якого виробництва та утилізації відходів техногенного походження на сьогоднішній день виходить на перший план. Про це свідчать не тільки відповідні державні нормативні документи, що постійно удосконалюються, а й міждержавні акти, в числі яких Кіотський і Картахенський договори, Паризька хартія тощо. З цієї причини при виборі способу виробництва лиття крім ефективності та економічності потрібно враховувати і питання екологічної, і санітарно-гігієнічної безпеки його виробництва.

В даний час переважну кількість виливків виготовляють в одноразових піщаних ливарних фор-

мах з використанням одноразових піщаних стрижнів. Сполучним матеріалом таких форм і стрижнів, як правило, є синтетичні смоли (СС). Основа цих СС: фенол, формальдегід, уретан, акрил та ін. У ливарних цехах СС використовують в таких процесах, як Rep-set, Alfa-set (α -set), Beta-set (β -set), Resol-CO₂, Epoxy-SO₂, Cold-box-amine, Pur-cold-box тощо.

Ливарні форми і стрижні, що виготовляють за цими процесами, характеризуються високими технологічними властивостями. Однак з точки зору:

- екологічної небезпеки зберігання і використання СС, утилізації продуктів їх деструкції (оксид вуглецю, метанол, формальдегід, фенол, ксилол, толуол, бензол, фурфурол, фуриловий спирт, сірчистий ангідрид, ізоацетат, епіхлоргідрин, дифенілпропан, акрилова кислота, гідропероксид ізоп-

Реп'ях Сергій Іванович – д.т.н., проф. НМетАУ
Солоненко Людмила Ігорівна – к.т.н., ОНПУ
Білий Олександр Петрович - НМетАУ,
Усенко Руслан Вікторович – к.т.н., доц. НМетАУ,
Узлов Костянтин Іванович – д.т.н., проф. НМетАУ.

Repyakh Serhey - d.t.s., prof. NMetAU
Solonenko Lydmila – c.t.s., ONPU
Bilyi Oleksandr - NMetAU
Usenko Ruslan - c.t.s., assistant professor NMetAU,
Uzlov Konstantin - d.t.s., prof. NMetAU

ропілбензолу, триметілолпропан і т.п.);

- існуючого рівня автоматизації виробництва форм і стрижнів;

- оснащеності обладнанням для термічної регенерації, уловлювання та утилізації канцерогенних речовин тощо, використання СС в умовах масового, багатосерійного і серійного виробництва лиття, слід визнати безперспективним і техногенно-небезпечним технологічним напрямом [1]. У той же час, реалізація заходів безпеки роботи з СС в повному обсязі і використання повного циклу регенерації і утилізації таких сумішей і їх відходів ставить під сумнів економічну ефективність використання СС в ливарному виробництві. У цьому випадку можливість використання СС в сумішах припустимо розглядати виключно для одиничного виробництва лиття, а так само при відсутності технологічних можливостей застосування альтернативних сполучних.

Альтернативою СС є сполучні матеріали неорганічного походження в числі яких – рідке скло (РС), фосфорна кислота, металофосфати, кремнезоль, гіпс тощо. З перерахованих сполучних матеріалів найбільш перспективним є РС, яке широко використовували в ливарних цехах у другій половині ХХ століття. Однак ряд істотних недоліків рідкоскляних форм і стрижнів привели до того, що вони були поступово замінені сумішами з СС.

Натрієве рідке скло відноситься до числа продуктів великотонажного неорганічного синтезу і виробляється в промислових масштабах у багатьох країнах світу. Цей матеріал негорючий і нетоксичний, екологічно безпечний на всіх етапах його використання, забезпечує високий санітарно-гігієнічний рівень виробництва, характеризується дешевизною і доступністю вихідної сировини, стабільністю властивостей і якості. У числі недоліків форм і стрижнів з піщано-рідкоскляних сумішей (ПРС) – крихкість, гіроскопічність, погана вибиваемість з виливків, складність, а інколи і неможливість регенерації та ін. Проте, особливості механізму затвердіння РС і його фізико-хімічні властивості привели до розробки безлічі способів усунення цих недоліків за рахунок обробки, модифікування, підготовки і способів затвердіння РС, виготовлення форм і стрижнів, регенерації відпрацьованих сумішей тощо.

З числа розроблених способів виготовлення ливарних форм і стрижнів з ПРС слід особливо виділити способи фізичних методів затвердіння, зокрема, тепловим сушінням. Пріоритетність цього напрямку пояснюється тим, що:

суміш, що затверділа таким чином, після вибивання можна не регенерувати, а використовувати в якості сировини для виробництва силікат-брили, попередньо провівши її помел і видаливши з неї сторонні частинки;

відсутні витрати на закупівлю, доставку, зберігання, підготовку і застосування технологічних добавок в ПРС;

затвердіння суміші тепловим сушінням забезпечує ПРС найбільшу міцність, високу газопроникність, практично зводить до нуля газотворну здатність, обсіпальність і т.д.

Істотними недоліками ливарних форм і стрижнів з ПРС, структурованих тепловим сушінням, є їх низька міцність в сирому стані, тривалість і енерговитратність сушки та регенерування, значні витрати на вибивання з виливків, неможливість використання стрижнів для виливків з легкоплавких кольорових металів. Проте, комплексне рішення задачі по усуненню зазначених недоліків даних сумішей дозволить не тільки підвищити економічність виробництва литих заготовок, але і вирішити проблему екологічної небезпеки, які супроводжує ливарні технології з СС.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У числі основних завдань, які повинні вирішувати сучасні ливарні форми і стрижні, не тільки отримання виливків необхідної точності, але і заданої структури. Це пояснюється тим, що більшість властивостей виливків структурно-чутливі [2-5], що особливо важливо для литих деталей відповідального і особливо відповідального призначення.

Структура матеріалу виливка, крім його хімічного складу, умов плавки і такого іншого, також зумовлюється інтенсивністю тепловідведення від виливка в період його затвердіння і охолодження в формі. У свою чергу, інтенсивність тепловідведення від виливка, що формується в формі, залежить від теплофізичних властивостей матеріалу форми і, зокрема, від величини його уявної щільності або порозності (пористості).

Особлива значимість величини уявної щільності структурованої суміші обумовлена не тільки її впливом на формування структури виливка, але і на шорсткість її поверхні, ймовірність появи у виливку газових раковин, тріщин, жолоблення, а також вибиваемості стрижнів з виливка тощо.

В даний час за викладеними вище причинами ПРС, що затверділа радіаційним способом або в потоці теплого повітря, в ливарних цехах України практично не використовують. Дуже обмежено в ливарних цехах застосовують ПРС, затвердіння яких проходить хімічним способом. З цією метою ущільнену (ущільнення ручне або механізоване, вібраційне, імпульсне, піскодувне піскометне) в опоці або стрижневному ящику ПРС, або продувають вуглекислим газом, або сумішшю вуглекислого газу з повітрям, або до набивання форм та стрижнів в ПРС вводять порошкоподібні матеріали, що містять сполуки двовалентних металів (ферохромовий шлак, нефеліновий шлам, двукальцієвий силікат), або рідкі ефіри багатоатомних спиртів (ацетат етиленгліколю, дибутилфталат, триацетін) тощо, з подальшим підсушуванням або пров'ялюванням на повітрі [6-11].

З метою поліпшення плинності в суміші вводять поверхнево-активні речовини, крохмалі [12-14]. Прискорення затвердіння РС досягають за рахунок

введення в суміш глини, порошку хроміту, хромомагнезиту [15-17]. Для зменшення пригару на сталевих виливках в ПРС додають хлористий натрій і залізню руду [18, 19]. Покращення вибиваємості стрижнів з виливків досягають шляхом введення в ПРС таких матеріалів як пилоподібний вермикуліт або перліт, золу-винесення теплових електростанцій, деревну тирсу, вугільний пил, глину, шамот, боксит, крейду, периклаз, домений шлак, фосфорит, перманганат або біхромат калію тощо. Крім цього, поліпшення вибиваємості відбувається при введенні в РС матеріалів органічного походження – житнього борошна, патоки або лігносульфонату, які оброблені лугою, рідкого кремнійорганічного затверджувача, ацетату етиленгліколю, або за рахунок зміни величини силікатного модуля РС, або зниження його кількості до рівня не більше 4% за масою [20-23], або плакування зерен піску полімерними матеріалами [24] тощо.

Аналіз цих способів та матеріалів показує, що на сьогодні, в цілому вирішуючи конкретну задачу, жоден з них не дозволяє в комплексі вирішити поставлену проблему. Це зумовлено тим, що використання будь-якої технологічної добавки або хімічне затвердіння РС призводить до необхідності проведення матеріало- і енерговитратної регенерації відпрацьованої суміші, оскільки така суміш не може бути використана а ні вторинно, а ні в якості вихідної сировини, наприклад, для виробництва силікат-брили. Крім цього, незалежно від способу ущільнення і типу технологічної добавки міцність форм та стрижнів з ПРС безпосередньо після їх виготовлення недостатня для маніпуляцій з ними, а вміст води неприйнятний для забезпечення отримання виливків без газових раковин, засмічень, ужимін тощо, що вимагає пров'ялювання, підсушування або певної тривалої сушки форм і стрижнів.

З числа найбільш перспективних напрямків виробництва форм і стрижнів з ПРС є способи виробництва форм і стрижнів в яких використовують надвисокочастотне електромагнітне випромінювання (НВЧ-випромінювання).

Використання НВЧ-випромінювання для сушки форм і стрижнів дозволяє в рази зменшити час і витрати енергоносіїв у порівнянні з сушінням в радіаційних печах, знизити вміст РС в суміші, використовувати відпрацьовану суміш в якості вихідної сировини для виробництва силікат-брили і т.д.

Однією з різновидів виготовлення ливарних форм та стрижнів з використанням НВЧ-випромінювання є паро-мікрохвильове затвердіння сумішей (ПМЗ-процес або SMC-process – steam microwave curing), спосіб – розроблений для виробництва піщаних ливарних форм і стрижнів [25].

Проте технології з використанням НВЧ-випромінювання в ливарних цехах в даний час ще не знайшли свого застосування. Однією з причин такого становища є відсутність даних або їх фрагментарність про умови та способи виробництва форм і стрижнів з використанням НВЧ-випромінювання, склади відповідних сумішей, властивості таких форм і стрижнів, а також науково-обґрунтованої бази даних таких технологій і, зокрема, опису механізму структурування сумішей за ПМЗ-процесом.

Мета і завдання досліджень. Мета роботи – дослідити властивості і структури компонентів структурованих ПРС, виявити закономірності їх змін та отримати науково-обґрунтовані результати, які забезпечать можливість розробки опису механізму структурування сумішей за ПМЗ-процесом.

Для досягнення зазначеної мети в роботі вирішували наступні завдання: визначення граничних значень вмісту води (вологи) в кварцовому піску та РС; визначення впливу розміру частинок кварцового піску і його плакування РС на сипкість; встановлення закономірності впливу фракційного складу чистого і плакованого РС кварцового піску на його уявну щільність після вібраційного ущільнення (ущільнення упродовж 2...3 хв при частоті вібрації 50 Гц і амплітуді коливань 0,1...0,2 мм); встановлення впливу плакування кварцового піску на його фракційний склад; дослідження різновидів структур затверділого РС в суміші з кварцовим піском.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проводили за стандартними і оригінальними методиками. В роботі використовували наступні матеріали: скло рідке натрієве содове з питомою щільністю 1400...1470 кг/м³ при 20 °С і силікатним модулем $M_{SiO_2} = 2,80...3,00$ за ГОСТ 1378; силікат-брила з питомою щільністю 2440 кг/м³ і $M_{SiO_2}=2,80...3,00$; вода дистильована; пісок кварцовий кар'єрний марок 2K₃O₄016, 1K₃O₃02 за ГОСТ 2138.

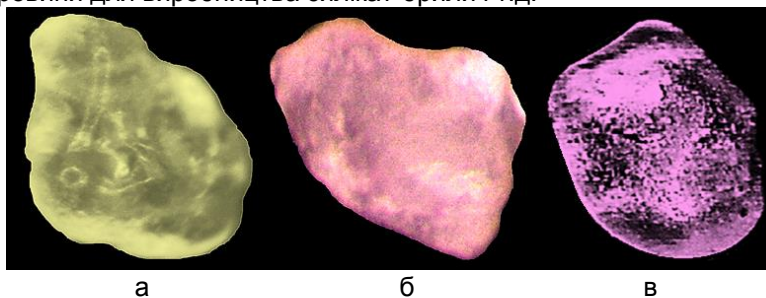


Рисунок 1 – Вигляд піщинок ($\times 200$) чистого кварцового піску (а), плакованих 2% (б) і 5% (в) рідкого скла, за масою

У дослідженнях використовували як чистий пісок марки 2K₁O₃016, 1K₃O₃02, так і пісок, плакова-

ний 1...5% РС (понад 100% маси піску), що був підфарбований червоним чорнилом. Для плакуван-

ня піску використовували РС з питомою щільністю 1440 кг/м^3 і силікатним модулем 2,93. Після змішування з РС такий пісок сушили, проводили помел в бігунах та розсів на приладі мод. 029. Типовий вигляд зерен чистого і плакованого піску представлений на рис. 1.

Піщинки піску, плакованого РС до 4%, мають кутасту форму, що за ГОСТ 2138 відповідає коефіцієнту кутастості $k_y = 1,4$. У піщинок, плакованих 4...5% РС, форма напівокруглена і, відповідно, $k_y = 1,25$.

Масу в дослідженнях визначали зважуванням з похибкою не більше 0,1 і 0,01 г для чого викорис-

товували електронні ваги. Структуру пісків і сумішей досліджували на мікроскопі NB-ХТЗВ при збільшеннях $\times 20 \dots \times 40$.

Сипкість – показник здатності зернистого матеріалу самопливом під дією гравітації розтікатися по горизонтальній поверхні оцінювали за результатами вимірювання діаметру (D^*) плями його розтікання. Вимірювання проводили в 4 напрямках, лінійкою з точністю 1 мм, відповідно до схеми на рис. 2.

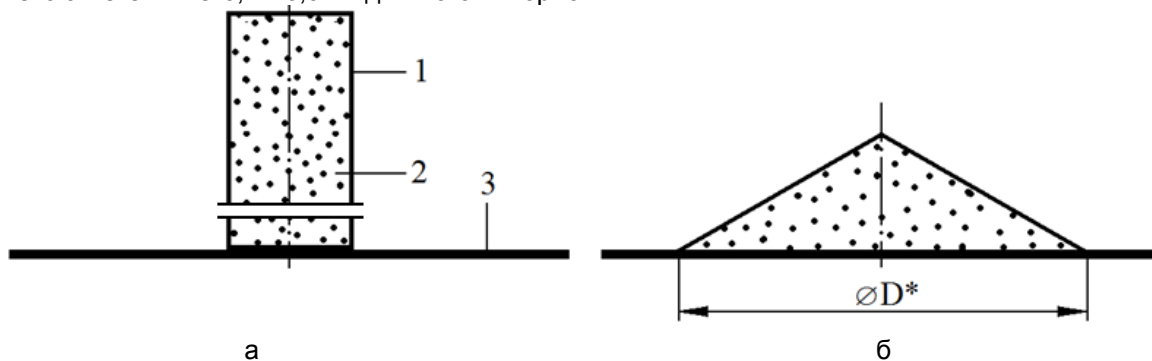


Рисунок 2 – Схеми розташування мірного циліндра 1 з піском 2 на поверхні скла 3 (а), і визначення діаметра плями розтікання піску по поверхні (б)

Класифікацію піску за вмістом в ньому води (сухий, вологий, сирий) здійснювали за результатами візуального контролю виду вібраційно ущільненого піску, видаленого з конусоподібної ємності на горизонтальну поверхню. Вміст води в піску у цих дослідженнях становив від 0,07 до 0,4% за масою. Для випробувань пісок з потрібним вмістом води поміщали в склянку ємністю 200 мл, яку розташовували на горизонтальному листі скла, та ущільнювали шляхом вібраційного впливу. Після цього склянку вертикально видаляли і через 10...15 с візуально оцінювали вигляд форми пісочної гори на склі та вимірювали діаметр плями розтікання піску.

Уявну щільність пісків визначали за масою вібраційно ущільненого піску в скляній ємності об'ємом 1 дм^3 . Ситовий (фракційний, гранулометричний) аналіз пісків проводили на приладі мод. 029. Вимірювання щільності РС проводили за допомогою ареометра з точністю $0,001 \text{ г/см}^3$ при $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Залишковий склад води у РС визначали як після його сушіння при $103 \pm 3^\circ\text{C}$ та $203 \pm 3^\circ\text{C}$, так і після сушіння в НВЧ-печі. Рідке скло для випробувань в дослідженнях на залишковий вміст в ньому води після сушки готували з силікат-брили з силікатним модулем 2,80, 2,85, 2,93 та 3,00. Для цього 100 г силікат-брили подрібнювали до порошкоподібного стану і розчиняли в 150 г дистильованої води. Приготоване РС висушували в зазначених вище умовах до постійної маси сухого залишку і зважували, згодом розраховуючи приріст маси дегідратованого РС і, відповідно, залишковий вміст води в висушеному РС.

Результати дослідження. Класифікація кварцових пісків марок $2\text{K}_1\text{O}_3\text{O}_2$ та $1\text{K}_3\text{O}_3\text{O}_2$ з величю коефіцієнта кутастості піщини $k_y=1,4$ за вмістом в них води (сухості). В залежності від масового вмісту води контури гори ущільненого піску на листі скла після його видалення зі склянки можуть мати одну з трьох типових конфігурацій, які схематично надано на рис. 3.

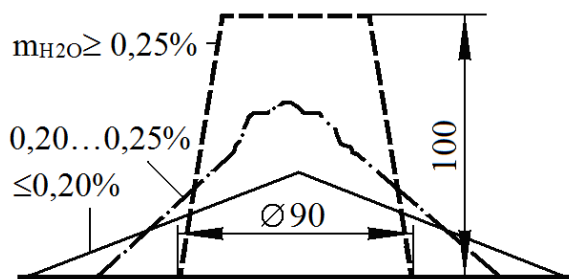


Рисунок 3 – Типові контури гори піску на горизонтально розташованому листі скла після видалення його з мірної склянки

Відповідно до цього по параметру сухості прийняли наступну класифікацію кварцових пісків. Сухому піску відповідає масовий вміст води $m_{H_2O} \leq 0,20\%$, вологому піску – $m_{H_2O} = 0,20...0,25\%$, сирому піску – $m_{H_2O} \geq 0,25\%$, що дещо не узгоджується з межами вологості, які наведені у класифікації за ГОСТ 2138. Виходячи з цих результатів в подальших дослідженнях використовували піски з вмістом води не більше 0,2% (за масою).

Результати визначення сипучості як окремих фракцій кварцових пісків, так і самих пісків з вмістом води до 0,2% за масою, показали, що їх сипкість не залежить від фракції (розмірів піщинок) і їх поєднань в суміші.

Дані про уявну щільності вібраційно ущільнених фракцій чистого і плакованого кварцового піску від середнього розміру його зерен (d) наведені в табл. 1, а залежність $\rho^* = f(D)$ представлена на рис. 4.

Таблиця 1 – Уявна щільність (ρ^*) вібраційно ущільнених чистих і плакованих кварцових пісків

Фракція піску	016-02	02-0315	0315-04	04-063	063-1
D, мм	0,18	0,26	0,36	0,51	0,81
ρ^* , кг/м ³	1927±12	1724±8	1537±5	1345±6	1063±7

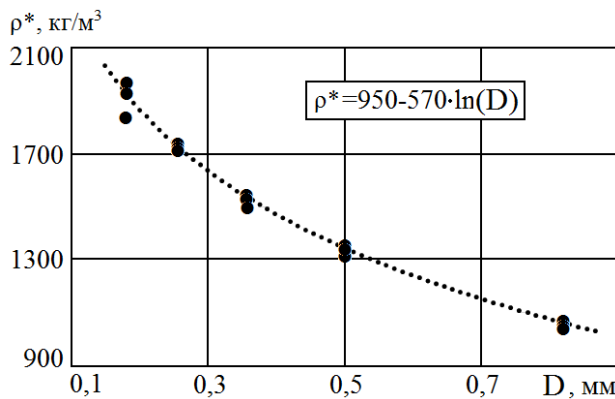


Рисунок 4 – Залежність уявної щільності вібраційно ущільненого чистого і плакованого кварцового піску від середнього розміру його зерен

В результаті складання і вирішення системи лінійних рівнянь методом Крамера, де в якості яких були прийняті номери сит, що використовують для ситового аналізу пісків, встановлено, що величини розрахованих коефіцієнтів є значеннями уявної щільності кварцового піску, ущільненого вібрацією. Тобто, для розрахунку уявної щільності чистого або плакованого РС кварцового піску, ущільненого вібрацією, можна використовувати формулу:

$$\rho^* = 1927 \cdot m_{016} + 1724 \cdot m_{02} + 1537 \cdot m_{0315} + 1345 \cdot m_{04} + 1063 \cdot m_{063}, \quad (1)$$

де $m_{016}...m_{063}$ – відносна маса фракції піску в суміші, що залишилася після його розсіву на ситах, нормованих в приладі мод. 029, відповідно, як 016...063.

У випробуваннях використовували суміші, що були приготовлені з різних фракцій піску та вібра-

ційно ущільнені. Результати вимірювань уявної щільності таких сумішей та розрахунків за формулою (1) наведені в табл. 2.

Особливістю прийнятого в роботі способу плакування кварцового піску є те, що після плакування і помелу в бігунах, в піску практично не залишається дрібних фракцій, про що свідчать дані наведені в табл. 3 і 4, а також гістограми на рис. 5 (вміст РС, яке пішло на плакування піску вказано на рис. 5).

Причиною зникнення дрібних фракцій піску після його плакування є виникнення конгломератів піщинок. Ідеалізована схема етапів зміни розмірів і форми частинок піску і вид реальних конгломератів піщинок після помелу, плакованих 5% РС представлені на рис. 6.

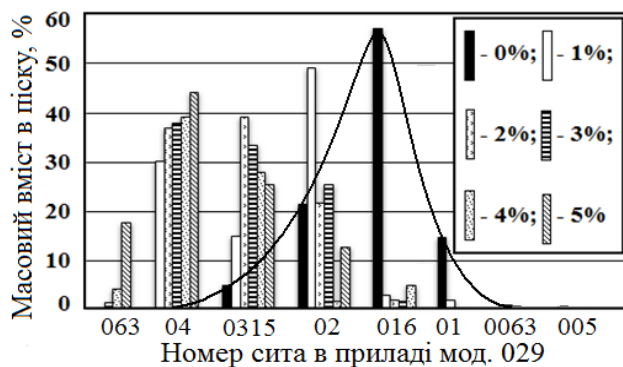


Рисунок 5 – Гранулометричний склад чистого і плакованого піску

Таблиця 2 – Результати розрахунків за формулою (1) і експериментальні (Експ.) значення уявної щільності для кварцового піску

п/п	Масова частка фракції в суміші					ρ^* , кг/м ³		$\Delta = 100 \frac{\rho_E^* - \rho_{(1)}^*}{\rho_E^*}, \%$
	016-02	02-0315	0315-04	04-063	063-1	Експ.	Розр. за (1)	
Частка РС, використаного для плакування - 0%								
1	0,7	0,3				1872	1870	0,11
2	0,7				0,3	1665	1669	-0,24
3	0,3	0,5	0,2			1755	1749	0,34
4		0,4	0,2	0,4		1532	1532	0,00
5	0,2	0,6	0,1	0,1		1711	1707	0,23
6		0,2	0,5	0,15	0,15	1463	1473	-0,68
Частка РС, використаного для плакування - 1%								
7	0,4	0,6				1809	1806	0,17
8		0,6	0,4			1653	1649	0,24
9		0,2	0,3	0,5		1471	1475	-0,27
10		0,1	0,8	0,1		1540	1539	0,06
11	0,1		0,4	0,3	0,2	1424	1421	0,21
12	0,5	0,1	0,1		0,3	1604	1608	-0,25
Частка РС, використаного для плакування - 2%								
13		0,25	0,75			1645	1587	3,53
14			0,35	0,65		1373	1409	-2,62
15		0,25	0,45	0,3		1490	1525	-2,35
16		0,25	0,60	0,15		1517	1556	-2,57
17	0,16	0,24	0,3	0,3		1564	1586	-1,41
18		0,22	0,528	0,132	0,12	1471	1495	-1,63
Частка РС, використаного для плакування - 3%								
19		0,75	0,25			1693	1676	1,00
20			0,35	0,65		1416	1409	0,49
21		0,25	0,45	0,3		1530	1525	0,33
22		0,25	0,60	0,15		1576	1556	1,27
23	0,12	0,22	0,528	0,132		1601	1601	0,00
24		0,215	0,516	0,129	0,14	1473	1485	-0,81
Частка РС, використаного для плакування - 4%								
25		0,25	0,75			1583	1587	-0,25
26			0,35	0,65		1410	1409	0,07
27		0,25	0,2	0,55		1437	1474	-2,57
28		0,36	0,08	0,56		1511	1492	1,26
29		0,252	0,056	0,392	0,3	1360	1359	0,07
30	0,12	0,22	0,176	0,48		1516	1524	-0,53
Частка РС, використаного для плакування - 5%								
31				0,5	0,5	1190	1194	-0,34
32				0,7	0,3	1260	1251	0,71
33			0,4	0,2	0,4	1300	1304	-0,31
34		0,15	0,8	0,05		1563	1559	0,26
35		0,05	0,45	0,45	0,05	1431	1434	-0,21
36		0,1	0,1	0,1	0,7	1193	1195	-0,17

Примітка. Δ – відносна похибка між розрахованими та експериментальними значеннями

Таблиця 3 – Фракційний склад піску 2K₁O₃016 (% за масою)

Вміст РС в піску, яке пішло на його плакування, % (за масою)	Розмір сторін осередків сітки в світлі								
	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	0,005	газик
0		0,2	5,1	21,4	57,0	14,8	1,1	0,4	0,01
1		30,3	14,9	49,0	3,1	2,0	0,7		
2		36,9	39,1	21,7	2,0	0,3			
3	1,4	37,9	33,5	25,4	1,8				
4	4,3	39,1	28,0	23,5	5,1				
5	17,7	44,4	25,5	12,7					

Таблиця 4 – Фракційний склад піску 1K₃O₃O₂ (% за масою)

Вміст РС в піску, яке пішло на його плакування, % (за масою)	Розмір сторін осередків сітки в світлі						
	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063
0		3,9	17,9	63,9	12,7	1,59	0,11
2	1,9	42,4	35,4	20,1	0,15	0,06	

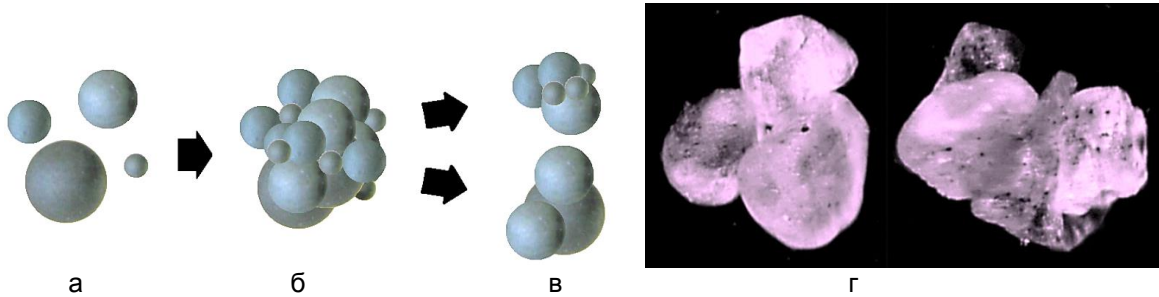


Рисунок 6 – Ідеалізована схема етапів зміни розмірів і форми частинок піску в початковому стані (а), після його плакування (б) і помелу (в), вид конгломератів піщинок після помелу, плакованих 5% РС (г)

Відповідно до ГОСТ 23409.24, даних табл. 5 і результатів визначення гранулометричного складу піску розраховували модуль його дрібноти (M_m):

$$M_m = \frac{\sum a_i \cdot m_i}{\sum m_i}, \quad (2)$$

де a_i – постійна величина для і-того нормованого

сита (див. табл. 5) приладу мод. 029; m_i – масова частка залишку піску на і-тому ситі приладу мод. 029, %.

Результати розрахунків за формулою (2) для різних сумішей кварцового піску представлені у вигляді залежності на рис. 7.

Таблиця 5 – Значення a_i для розрахунку модуля дрібноти по ГОСТ 23409.24.

Номер сита	2,5	1,6	1	063	04	0315	02	016	01	0063	005	тазик
a_i	-	5	9	20	30	40	53	65	105	165	210	300

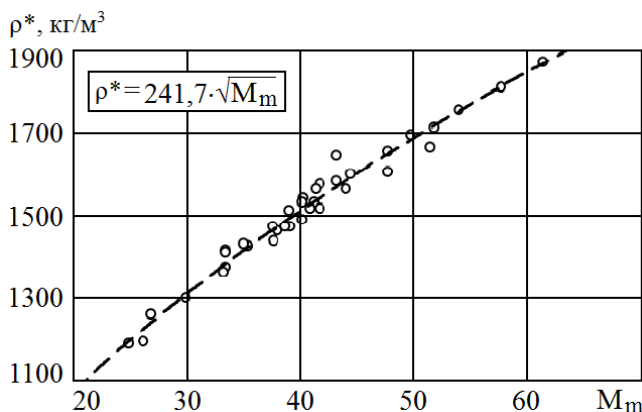


Рисунок 7 – Залежність уявної щільності чистого та плакованого піску після ущільнення вібрацією від його модуля дрібноти

Залишковий склад води у рідкому склі після НВЧ-сушіння. За результатами обробки експериментальних даних для РС технічної чистоти з $M_{SiO_2}=2,8...3,0$ встановлено, що при 20 ± 1 °C масова частка води (ϕ_{H_2O}) практично не залежить від величини M_{SiO_2} . При цьому масову частку води в водному розчині та твердому силікату натрію (ϕ_{H_2O}) в межах від 0 до 1 з точністю прийнятною для ін-

женерних розрахунків, можна розраховувати за емпіричною формулою:

$$\phi_{H_2O} = 1 - \phi = 1 - 0,002968 \cdot (\rho - 1000)^{0,8} \quad (3)$$

де ϕ – масова частка силікату натрію в РС; ρ – питома щільність РС при температурі 20 ± 1 °C, kg/m^3 .

Твердіння РС при сушінні відбувається в результаті випаровування з нього води. Нагрівання

РС (теплова сушка) прискорює процес випаровування води з РС і, відповідно, скорочує час його твердіння. Проте в затверділому при тепловій сушці РС (при 103 ± 3 °C) вода залишається, про що свідчить залежність на рис. 8.

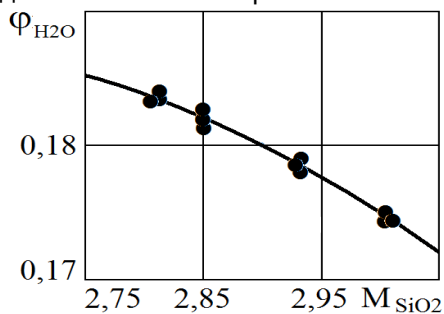


Рисунок 8 – Залежність масової частки води в РС після сушіння на повітрі при 103 ± 3 °C до постійної маси від його силікатного модуля

Таблиця 6 – Вміст води в висушеному рідкому склі

ρ_{20} , кг/м ³	M_{SiO_2}	ϕ_{H_2O} , % (вихідні)	ϕ_{H_2O} після сушки до постійної маси, %		
			при 103 ± 3 °C	при 203 ± 3 °C	в НВЧ-печі
1400	3	63,6	$17,4 \pm 0,3$	$7,6 \pm 0,3$	<0,1
1440		60,7	$17,5 \pm 0,5$		
1400	2,93	63,6	$17,9 \pm 0,6$	$7,1 \pm 0,3$	
1440		60,7	$17,8 \pm 0,4$		
1400	2,81	63,6	$18,4 \pm 0,3$	$7,2 \pm 0,4$	
1440		60,7	$18,1 \pm 0,7$		

З цього випливає, що НВЧ-сушка суміші набагато ефективніше за теплову, яку здійснюють за рахунок радіаційної передачі тепла до суміші ззовні.

Дослідження структур РС в поровому просторі непов'язаних між собою частинок кварцового піску. Для досліджень використовували суміші піску з РС. При цьому суміш №1 та №2 містили РС по

25% (за масою), суміш №3 – 10% (за масою) в рідкому стані. Суміш №2 перед обробкою в НВЧ-печі була попередньо висушена при 203 ± 3 °C. Після приготування всі суміші проходили обробку (сушіння) в НВЧ-печі. Структури затверділих сумішей, що були при цьому сформовані представлені на рис. 9.

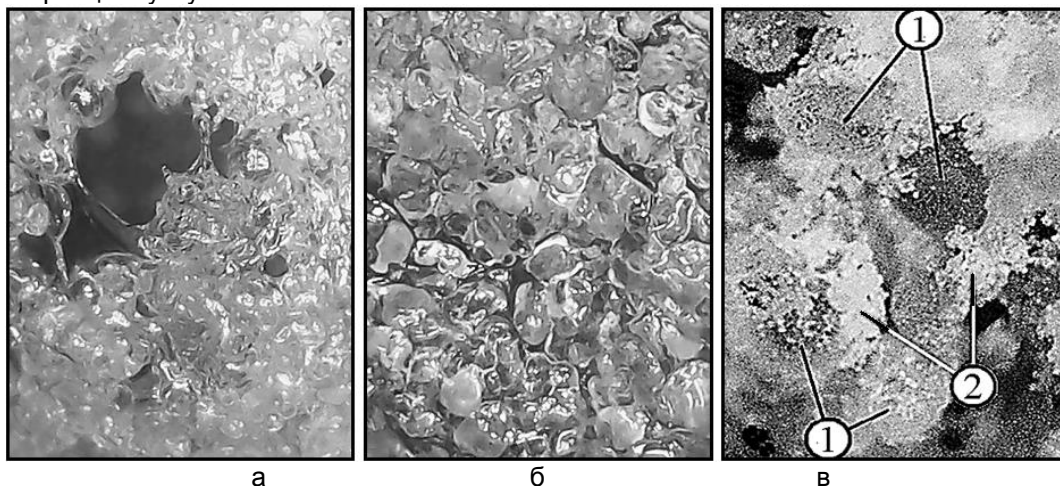


Рисунок 9 – Пінно-ніздрювата (а) і щільна (б) структури піщано-рідкоскляної суміші №1 з 15% РС (за масою), що сформувалися через 7 і 30 с впливу на суміш НВЧ-випромінювання ($\times 20$), структура піщано-рідкоскляної суміші №2 з безперервною пінною рідкоскляною фазою ($\times 40$): 1 – зерна кварцового піску; 2 – затверділа рідкоскляна піна

Аналіз структур на рис. 9,а показує, що суміш №1 в затверділому стані являє собою газонепроникну неоднорідну за структурою систему, насичену газовими бульбашками діаметром до 7 мм. Причиною появи такої структури стало велика кі-

лькість РС у вихідній суміші, яке екранує дію НВЧ випромінювання на глибинні шару суміші та перешкоджає виходу водяної пари в атмосферу з її глибинних шарів. Тобто, пінна структура – це результат перевищення удаваної швидкості утво-

рення пари в суміші над удаваною швидкістю дифузії води через зовнішній шар дегідратованого затверділого РС.

Суміш №2 формувалася в умовах зниженого вмісту води в РС кипіння води під час сушки суміші, що і попередило утворенню пінної структури (див. рис. 9,б). Відповідно, при НВЧ обробці РС спучується у всьому об'ємі зразка практично одночасно, утворюючи дрібну пінну міжзеренну структуру (див. рис. 9,в).

При малій кількості РС випаровування з нього води відбувається з тонких плівок без виникнення пінних структур, але з утворенням міжчасткових містків між зернами кварцового піску. Така структура характеризується високою газопроникливістю. Однак вкрай низька плинність таких сумішей

вимагає застосування зовнішнього впливу на неї в процесі ущільнення суміші в опоці або стрижнево-му ящику. Тобто, для спрощення процесу формування необхідно використовувати кварцовий пісок, плакований РС. У цьому випадку заповнення модельного оснащення можна буде здійснювати під дією гравітації під час ущільнення піску шляхом вібрації.

Такі можливості реалізовані при структуруванні плакованого піску або іншого вогнетривкого матеріалу ПМЗ-процесом. В цьому випадку, зерна піску в місцях взаємного контакту з'єднані між собою містками затверділого РС, про що свідчить рис. 10, де представлені фрагменти зневоднених структур ПРС, структурованої за ПМЗ-процесом в НВЧ-печі.

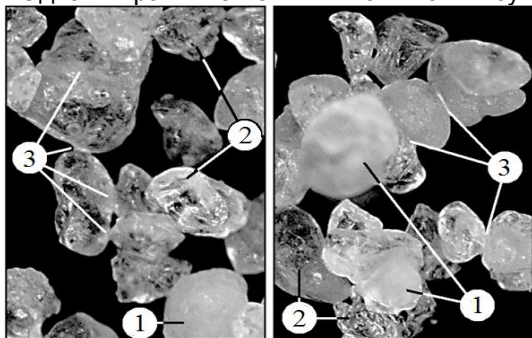


Рисунок 10 – Структурована суміш з плакованого піску за ПМЗ-процесом: 1 – зерна кварцового піску із суцільним шаром РС; 2 – зерна кварцового піску без суцільного шару РС; 3 – рідкоскляні міжзернові місткі

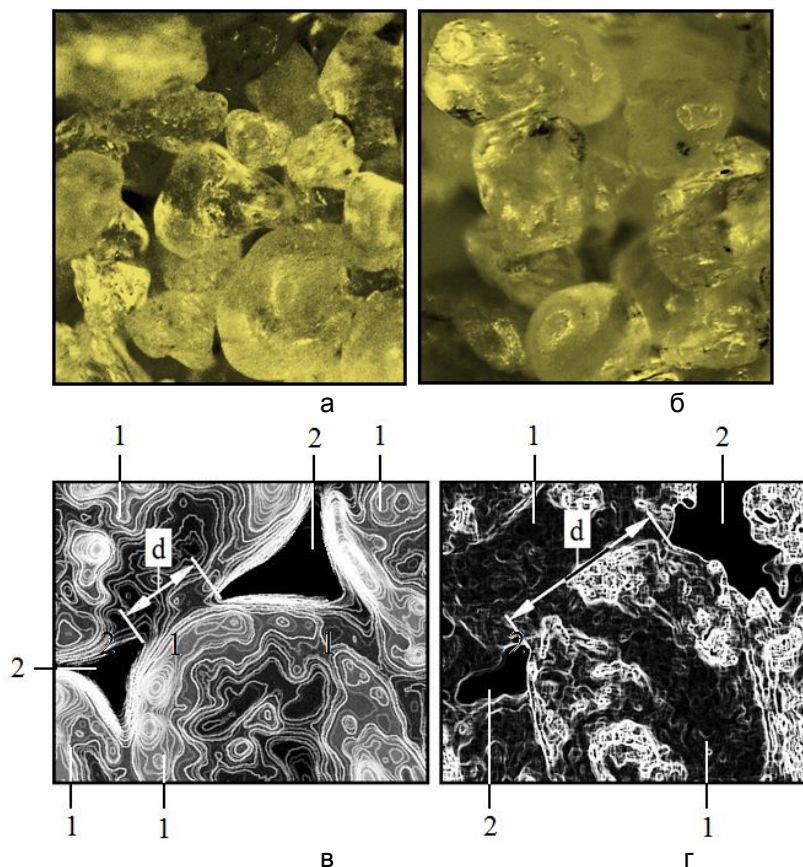


Рисунок 11 – Структура піщано-рідкоскляної суміші структурованої за ПМЗ-процесом (а) і в результаті теплового радіаційного сушіння суміші піску з РС (б), вид містків силікату натрію діаметром d між піщинками на контурно-тіньовому зображенні піску, для плакування якого використовували 5% (в) РС і який до сушки був змішаний з 5% (г) РС: 1 – піщинка; 2 – пора (капілярний канал)

Суміші, структуровані за ПМЗ-процесом, характеризуються рівнем властивостей істотно відмінним від сумішей з тією ж кількістю РС, але приготованих шляхом змішування піску з РС, набивки суміші в оснащенні з її подальшою тепловою сушкою безпосередньо в оснащенні. Ця відмінність пояснюється тим, що відповідно до ПМЗ-процесу заповнення оснащення плакованим піском здійснюється під дією гравітації (вільним засипанням в оснащення) з подальшим віброуцільненням піску. Як результат – уявна щільність суміші, що затверділа, виявляється трохи нижче, ніж у суміші ущільненої набиванням. При цьому, в ПМЗ-процесі, на відміну від суміші піску з РС в процесі масопереносу під дією капілярних сил бере участь менша кількість сполучної речовини (РС). Відповідно, діаметр містків (d) затверділого РС між піщинками за ПМЗ-процесом, буде менший, що впливає з виду фрагментів структур структурованих сумішей на рис. 11

Обговорення результатів. Результати визначення сипучості чистого і плакованого кварцового піску свідчать про те, що даний показник не залежить від середніх розмірів його частинок і визначається виключно величиною вологості піску – вмістом в піску вільної води. У той же час уявна щільність пісків, ущільнених вібрацією, залежить від середніх розмірів частинок, модуля дрібноти, але не залежить від їх форми.

Встановлена межа вологості піску 0,2% (за масою), по суті, є однією з умов успішного виробництва якісних форм і стрижнів, коли заповнення модельного оснащення проводять під дією гравітації, а встановлена закономірність між уявною щільністю пісків і їх фракційним складом дозволяє з похибкою до 4% (див. табл. 2) прогнозувати очікувану величину уявної щільності пісків будь-якого фракційного складу. У свою чергу, дана інформація дозволяє провести первинну оцінку теплофізичних властивостей форм і стрижнів і, відповідно, очікуваного результату за якістю виливків в разі використання нових або видозмінених сумішей.

Затверділе РС являє собою гель, що складається з тривимірного полімерного каркаса силікату натрію з водою або без води. Просторова структура, ступінь полімеризації силікату натрію і наявність в ньому води дозволяють йому зберігати свою форму, надають певну міцність і здатність до деформації. З цього, дані про залежність вмісту силікату натрію в його водному розчині від питомої щільності розчину і дані про залишковий вміст води в затверділому РС набувають особливого значення для розробки нових і вдосконалення існуючих способів структурування ПРС.

В цілому отримані дані не суперечать даним інших дослідників, але уточнюють їх і можуть бути використані для оцінки як способів виготовлення

рідкоскляних ливарних форм і стрижнів, так і розрахунків їх газотвірної здатності, обсипальності, міцності, вибиваємості і тому подібного.

В цьому відношенні найбільш цікавим є факт повного зневоднення РС під дією НВЧ-випромінювання. Можливість повного видалення води з структурованої ПРС дозволяє отримувати форми і стрижні практично негазотвірними. Відповідно, для таких сумішей завдання щодо підвищення газопроникності втрачає свою актуальність, а збільшення уявної щільності в цьому випадку дозволяє вирішити завдання підвищення чистоти поверхні виливків, попередження появи в виливках ужимін і так далі.

Дані про структури РС в структурованих сумішах свідчать про широкі можливості цілеспрямованого керування впливом відомих технологічних прийомів на властивості ПРС і вимагають свого подальшого предметного вивчення.

Висновки. 1. Сипучість піску не залежить від його фракції або суміші його фракцій. При цьому, найбільшою сипучістю характеризуються піски з вмістом вільної води (вологи) до 0,2% за масою.

2. Уявна щільність вібраційно ущільненого піску (чистого, плакованого) адитивна пайовому масовому вмісту в ньому нормованих фракцій піщинок і зростає від 1100 до 1900 кг/м³ зі зменшенням середнього розміру його зерен від 0,82 до 0,16 мм і зі збільшенням модуля їх дрібноти від 20 до 60.

3. Плакування і подальший помел сухого піску призводить до збільшення розмірів його частинок і зникнення дрібних фракцій вихідного піску, що обумовлено утворенням великих конгломератів піщинок. При цьому, збільшення кількості РС для плакування від 1 до 5% за масою (понад 100% маси піску) призводить до підвищення розмірів конгломератів.

4. Для содового натрієвого рідкого скла з величиною силікатного модуля від 2,8 до 3,0 встановлена закономірність і отримана аналітична залежність між вмістом в ньому силікату натрію і питомою щільністю при 20 °С.-

5. Сушіння натрієвого рідкого скла з величиною силікатного модуля від 2,8 до 3,0 при температурі 100...106 °С призводить до його затвердіння із залишковим вмістом води від 17,2 до 18,5% за масою, НВЧ-випромінювання сприяє твердінню РС без залишкового вмісту в ньому води.

6. Залежно від кількості РС в суміші, його фізичного стану до моменту початку структурування суміші і способу його затвердіння структура затверділого РС в структурованій ПРС може змінюватися від щільно-орієнтованої до пінно-дезорієнтованої, містити і не містити залишкову воду, бути крихкою або пластичною, володіти високою або вкрай низькою газопроникністю.

Бібліографічний опис

1. Ткаченко С.С., Болдин А.Н. Экология – как критерий эффективности литейного производства будущего. Литье Украины. 2013. №7. С. 29–30
2. Uzlov K.I. Scientific statements of technological solutions related to control of structure formation in high-strength wheel-tire steel. Metallurgical and Mining Industry. 2010. Vol. 2. № 6. P. 413–419. (Scopus)
3. Fracture pattern analysis of bainite high-strength cast-iron commercial products depending on structural condition / K.I. Uzlov and oth. Metallurgical and Mining Industry. 2010. Vol. 2. № 4. P. 291–297. (Scopus)
4. Напряжения в полых цилиндрических комбинированных отливках / В.Ф. Мазорчук та ін. Научный вестник НГУ. 2018. № 3. С. 94–100. (Scopus)
5. Христосова В.Ю., Бондарева О.С. Влияние скорости кристаллизации на морфологию структурных составляющих жаропрочного сплава ЖС30. Литейное производство. 2019. №1. С. 13–15.
6. Кукуй Д.М., Скворцов В.А. Улучшение технологических свойств смесей с жидким стеклом. Литейное производство. 1983. № 1. С. 15–16.
7. А. с. 1369848 СССР, МКИ В22С 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / И.А. Микей, С.А. Флейман, О.И. Смолькова и др. № 4037042/23-02; заявл. 11.03.1986; опубл. 30.01.1988, Бюл. № 4.
8. Смесь для изготовления форм и стержней: пат. 2224619 РФ: МПК В22С 1/18. № 2002120026/02; заявл. 27.07.2004; опубл. 27.02.2004, Бюл. № 5.
9. Nothing is impossible – advancements in inorganic binder systems / J. Müller and oth. Casting Plant & Technology. 2015. № 2. P. 16–22.
10. Mück F., Appelt C. Inorganic binder systems in iron casting – current state of development and outlook. Casting Plant & Technology, 2018. № 3. P. 12–17.
11. Жуковский С.С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: Справочник. Москва: Машиностроение, 2010. 256 с.
12. Вспомним забытые технологии: о выбиваемости жидкостекольных Статьи от автора смесей из отливок / Белобров Е.А. и др. Литье Украины, 2018. №6. С. 17–23.
13. Специальные добавки. Технические науки – металлургия и обработка металлов: веб-сайт. URL: <https://uchebnikfree.com/obrabotka-metallov-metallurgiya/spetsialnyie-dobavki-43595.html> .
14. О новом подходе к использованию жидкостекольных технологий для производства литья в период всеобщего кризиса. Часть 2. Стержни и формы, отверждаемые в камерных сушилах / Е.А. Белобров и др. Литье Украины, 2009, № 3. С. 8–15.
15. Лясс А.М. Быстротвердеющие формовочные смеси. Москва: Машиностроение, 1965. 331 с.
16. Шувалов В.Г., Зотова И.Г., Бородин М.А. Жидкостекольные смеси с модификатором ФМ для изготовления стержней. Литейное производство, 1982. № 9. С 19–20.
17. Лебцев Е.Н., Клещевникова С.И. Связующий материал на основе гидрозоль кремнезёма для производства точного литья. Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева. Москва, 1979. С. 83–84.
18. Насанкин А.Ф., Белобров Е.А. Методы борьбы с пригаром на стальном литье. «Машиностроение», 1962, вып. 2.
19. Суходольская Е.А., Белобров Е.А., Насанкин А.Ф. О пригаре на стальных отливках. В сб. «Механизация и технология литейного производства». Харьковское книжное издательство, 1962.
20. Корнеев В.И, Данилов В.В. Растворимое и жидкое стекло. Санкт-Петербург: Стройиздат, СПб., 1996. 216 с.
21. Пути улучшения выбиваемости жидкостекольных смесей / А. А. Костиков и др. Вісник НТУ «ХПІ», 2015. №36(1145). С. 72-75.
22. Композиция для изготовления теплоизоляционного материала: пат. 2134672 РФ: МПК С04В38/08, С04В28/26, С04В14:00, С04В14:18, С04В111:20. № 96120659/03; заявл. 15.10.1996; опубл. 20.08.1999. Бюл 4.
23. Евстигнеев А.И., Петров В.В., Дмитриев Э.А. Жидкостекольные смеси с улучшенными технологическими свойствами. Литейное производство. 2008. № 12. С. 25–27.
24. Смесь для изготовления литейных форм и стержней: пат. 2425732 РФ: МПК В22С 1/02. № 2010130970/02; заявл. 23.07.2010; опубл. 10.08.2011. Бюл. №22.
25. Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідкоскляних сумішей: МПК7 В22С 9/12. Заявка на винахід № а 201901350; заявл. 11.02.2019.

References

1. Tkachenko S.S., Boldin A.N. Ekologiya – kak kriteriy effektivnosti liteynogo proizvodstva budushchego. Lit'ye Ukrainy. 2013. №7. S. 29–30
2. Uzlov K.I. Scientific statements of technological solutions related to control of structure formation in high-strength wheel-tire steel. Metallurgical and Mining Industry. 2010. Vol. 2. № 6. P. 413–419. (Scopus)
3. Fracture pattern analysis of bainite high-strength cast-iron commercial products depending on structural condition / K.I. Uzlov and oth. Metallurgical and Mining Industry. 2010. Vol. 2. № 4. P. 291–297. (Scopus)
4. Napryazheniya v polykh tsilindricheskikh kombinirovannykh otlivkakh / V.F. Mazorchuk ta in. Nauchnyy vestnik NGU. 2018. № 3. S. 94–100. (Scopus)
5. Khristosova V.YU., Bondareva O.S. Vliyaniye skorosti kristallizatsii na morfologiyu strukturnykh sostavlyayushchikh zharoprochnogo splava ZHS30. Liteynoye proizvodstvo. 2019. №1. S. 13–15.
6. Kukuy D.M., Skvortsov V.A. Uluchsheniye tekhnologicheskikh svoystv smesey s zhidkim steklom. Liteynoye proizvodstvo. 1983. № 1. S. 15–16.
7. A. s. 1369848 SSSR, MKI V22S 1/18. Smes' dlya izgotovleniya liteynykh form i stержney / I.A. Mikey, S.A. Fleyman, O.I. Smol'kova i dr. № 4037042/23-02; zayavl. 11.03.1986; opubl. 30.01.1988, Byul. № 4.

8. Smes' dlya izgotovleniya form i sterzhney: pat. 2224619 RF: MPK V22S 1/18. № 2002120026/02; zayavl. 27.07.2004; opubl. 27.02.2004, Byul. № 5.
9. Nothing is impossible – advancements in inorganic binder systems / J. Müller and oth. Casting Plant & Technology. 2015. № 2. P. 16–22.
10. Mück F., Appelt C. Inorganic binder systems in iron casting – current state of development and outlook. Casting Plant & Technology, 2018. № 3. P. 12–17.
11. Zhukovskiy S.S. Kholodnotverdeyushchiye svyazuyushchiye i smesi dlya liteynykh sterzhney i form: Spravochnik. Moskva: Mashinostroyeniye, 2010. 256 s.
12. Vspomnim zabytyye tekhnologii: o vybivayemosti zhidkostekol'nykh Stat'i ot avtora smesey iz otlivok / Belobrov Ye.A. i dr. Lit'ye Ukrainy, 2018. №6. S. 17–23.
13. Spetsial'nyye dobavki. Tekhnicheskiye nauki – metallurgiya i obrabotka metallov: veb-sayt. URL: <https://uchebnikfree.com/obrabotka-metallov-metallurgiya/spetsialnyie-dobavki-43595.html>
14. O novom podkhode k ispol'zovaniyu zhidkostekol'nykh tekhnologiy dlya proizvodstva lit'ya v period vseobshchego krizisa. Chast' 2. Sterzhni i formy, otverzhdayemye v kamernykh sushilakh / Ye.A. Belobrov i dr. Lit'ye Ukrainy, 2009, № 3. S. 8–15.
15. Lyass A.M. Bystrotverdeyushchiye formovochnyye smesi. Moskva: Mashinostroyeniye, 1965. 331 s.
16. Shuvalov V.G., Zotova I.G., Borodin M.A. Zhidkostekol'nyye smesi s modifikatorom FM dlya izgotovleniya sterzhney. Liteynoye proizvodstvo, 1982. № 9. S 19–20.
17. Lebtsev Ye.N., Kleshchevnikova S.I. Svyazuyushchiy material na osnove gidrozoley kremnezoma dlya proizvodstva tochnogo lit'ya. Trudy MKHTI im. D.I. Mendeleyeva. Moskva, 1979. S. 83–84.
18. Nasankin A.F., Belobrov Ye.A. Metody bor'by s prigarom na stal'nom lit'ye. «Mashinostroyeniye», 1962, vyp. 2.
19. Sukhodol'skaya Ye.A., Belobrov Ye.A., Nasankin A.F. O prigare na stal'nykh otlivkakh. V sb. «Mekhanizatsiya i tekhnologiya liteynogo proizvodstva». Khar'kovskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1962.
20. Korneyev V.I., Danilov V.V. Rastvorimoye i zhidkoye steklo. Sankt-Peterburg: Stroyizdat, SPb., 1996. 216 s.
21. Puti uluchsheniya vybivayemosti zhidkostekol'nykh smesey / A. A. Kostikov i dr. Visnik NTU «KHPÍ», 2015. No36(1145). S. 72-75.
22. Kompozitsiya dlya izgotovleniya teploizolyatsionnogo materiala: pat. 2134672 RF: MPK C04B38/08, C04B28/26, C04B28/26, C04B14:00, C04B14:18, C04B111:20. № 96120659/03; zayavl. 15.10.1996; opubl. 20.08.1999. Byul 4.
23. Yevstigneyev A.I., Petrov V.V., Dmitriyev E.A. Zhidkostekol'nyye smesi s uluchshennymi tekhnologicheskimi svoystvami. Liteynoye proizvodstvo. 2008. № 12. S. 25–27.
24. Smes' dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney: pat. 2425732 RF: MPK V22S 1/02. № 2010130970/02; zayavl. 23.07.2010; opubl. 10.08.2011. Byul. №22.
25. Sposib vigotvleniya livarnikh form i strizhniv z ridkosklyanikh sumishey: MPK7 V22S 9/12. Zayavka na vinakhid № a 201901350; zayavl. 11.02.2019.

Стаття поступила 14.01.2019