

УДК 621.74

<https://doi.org/10.34185/tpm.5.2021.08>

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

Прогнозування властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі

Solonenko L., Repyakh S., Uzlov K., Bilyi O., Usenko R., Bilyi A., Ivanova L. Sand-sodium-silicate mixtures structured in steam-microwave environment properties prediction

Багатофакторність, нерівнозначність і різновекторність впливу умов виробництва на якість виливків – характерні риси будь-якої ливарної технології. Ці особливості призводять до постійного «дрейфу» в часі оптимального поєднання властивостей ливарних форм і стрижнів, співвідношень значущості факторів і технологічної вагомості параметрів в процесі формування якості виливків і стабільності технології їх виробництва. Тому робота, що присвячена розробці методики прогнозування властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі (ПМЗ-процес), є актуальною.

Мета. Розробити методику розрахунку властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі.

Методика. Для встановлення загальної структури передбачуваної залежності між обраними параметрами, заснованої тільки на інваріантності фізичної залежності при зміні масштабів одиниць, використовували π -теорему аналізу розмірностей. З цією метою припустили, що між n даних фізичних величин (відібраних параметрів) існує якась залежність, у якій вид постійний навіть при зміні масштабів одиниць в деякому класі систем одиниць. Тобто, вона еквівалентна залежності між меншим числом $p=n-k$ безрозмірних величин, де k – найбільше число величин з незалежними розмірностями серед вихідних n величин.

Наукова новизна. Вперше розроблена методика розрахунку властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані за ПМЗ-процесом, що дозволяє на теоретичному рівні корегувати як склад суміші, так і її властивості.

Практична значущість. Використання методики розрахунків властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих за ПМЗ-процесом, дозволить підвищити точність аналізів і прогнозування властивостей сумішей та при необхідності, відповідним чином змінити склад суміші, скорегувати відповідні технологічні параметри виробництва формувальних та стрижневих сумішей, зменшити витрати на процес оптимізації складу цих сумішей.

Ключові слова: піщано-рідкоскляна суміш, ПМЗ-процес, властивості, аналіз, прогнозування, методика, розрахунок

Abstract. Multifactoriality, inequivalent and multi-vector influence of production conditions on castings quality are characteristic features for any foundry technology. These features lead to constant "drift" in time of casting molds and cores properties optimal combination, as well as, of castings quality forming and their production technology factors stability importance and parameters technological significance processing ratio. Therefore, the study devoted to method for properties predicting of sand-sodium-silicate mixtures structured in steam-microwave environment (SMS-process) development is relevant.

Purpose. To elaborate sand-sodium-silicate mixtures structured in steam-microwave environment properties calculating methodology.

Methodology. To establish the general structure of expected correspondence between selected parameters, based only on invariance of physical dependence with changing units scales, dimensional analysis π -theorem has been used. For this purpose, it has been assumed that some kind of dependence exists between n given physical indices (selected parameters), which form is constant even when units scale changes in some class of units systems. That is, it is equivalent to dependence between smaller number of $p=n-k$ dimensionless quantities, where k is largest quantities number with independent dimensions among original n quantities.

Originality. For the first time, methodology for sand-sodium-silicate mixtures structured by SMS-process properties calculating has been elaborated. That allows adjusting both mixture composition and its properties at theoretical level.

Practical value. Sand-sodium-silicate mixtures, structured according to SMS-process, properties calculating method using will allow to increase analyze accuracy and mixtures properties forecasting. And if necessary, it is possible to change mixture composition accordingly, to adjust relevant molding and core mixtures production technological parameters, to reduce costs of these mixtures composition optimizing process.

Keywords: sand-sodium-silicate mixture, SMS-process, properties, analyze, prediction, methodology, calculation

Вступ. В даний час комплексну оцінку структурованих формувальних та стрижневих сумішей (ФСС), як правило, проводять виходячи з величин їх наступних показників:

- газодинамічних (газопроникність, газотвірна здатність);

- теплофізичних (уявна щільність, питома теплоємність, теплопровідність, температуропровідність, теплоакуюча здатність);

- фізико-хімічних (вологість, фракційний склад, форма частинок зернистого вогнетривкого матеріалу суміші, модуль Юнга, хімічна активність у став-

Солоненко Людмила Ігорівна – к.т.н., доц., УДУНТ
Реп'ях Сергій Іванович – д.т.н., с.д., УДУНТ,
Узлов Костянтин Іванович – д.т.н., проф. УДУНТ,
Білий Олександр Петрович – к.т.н., доц., УДУНТ,
Усенко Руслан Вікторович – к.т.н., доц. УДУНТ,
Білий Андрій Петрович – ТОВ «Багістрой»,
Іванова Людмила Харитонівна – д.т.н., проф. УДУНТ

Lyudmila Solonenko – c.t.s., USUST
Serhiy Repyakh – d.t.s., USUST
Kostyantyn Uzlov – d.t.s., USUST
Bilyi Oleksandr – c.t.s. USUST
Ruslan Usenko – c.t.s. USUST
Andriy Bilyi - "Bagistry" LLC,
Ivanova Lyudmila – d.t.s. USUST

ленні до залитого металу або сплаву тощо), у тому числі, механічних (межа міцності на стиск, розтягання, статичний вигин, твердість тощо);

- технологічних (обсипальність, податливість, плинність, стиранність, ремонтпридатність, придатність до регенерації, гіроскопічність, схильність до утворення ужимін, прилипання до оснащення, робота вибивання і т.д.).

Багатофакторність, нерівнозначність і різновекторність впливу умов виробництва на якість виливків – характерні риси будь-якої ливарної технології. Ці особливості призводять до постійного «дрейфу» в часі оптимуму поєднання властивостей ливарних форм і стрижнів, співвідношень значущості факторів і технологічної вагомості параметрів в процесі формування якості виливків і стабільності технології їх виробництва. З цього, успішне і швидке рішення ливарних завдань пов'язано не тільки зі знанням значень перерахованих вище властивостей і параметрів, але і їх взаємного впливу, зі знанням закономірностей їх комплексної зміни при виникненні відхилень від технологічного регламенту виробництва лиття.

Аналіз літературних даних. Дослідженням властивостей ливарних форм та стрижнів (ЛФС) присвячена велика кількість робіт [1...7 та ін.], з яких витікає, що до числа найбільш важливих параметрів сумішей для ЛФС відносять: щільність, обсипальність, газопроникність, міцність, відносну величину стріли прогину до руйнування і роботу вибивання.

Справжня та уявна щільність (ρ). Справжня щільність (γ) будь-якого матеріалу являє собою співвідношення його маси (m) до об'єму (V), уявна щільність – співвідношення маси матеріалу до його об'єму з порами.

За інших рівних умов справжня щільність залежить від природи матеріалу, а уявна щільність – від фракційного складу суміші, способу її ущільнення, структурування, форми її часток, об'єму пор і т.п. Для ФСС з підвищенням уявної щільності, знижується газопроникність, збільшується міцність, теплоакумуюча здатність, маса ЛФС тощо.

Обсипальність (O_c) – показник поверхневої міцності або здатності поверхні виробу (форми, стрижня, зразка) протистояти руйнуванню при стиранні. Obsипальність за ГОСТ 23409.9 визначають у %, як відносну зміну маси зразка циліндричної форми ($\varnothing 50 \times 50$ мм) зі структурованої суміші до і після його стирання протягом 1 хв в обертовому сітчастому барабані.

Obsипальність залежить від міцності структурованої суміші, природи і кількості сполучного матеріалу в суміші, уявної щільності і т.п. та, як правило, в перші години після завершення структурування збільшується у часі. За інших рівних умов на величину обсипальності істотно впливає питома щільність застосовуваного в суміші зернистого вогнетривкого матеріалу, форма та розмір його зерен і т.п. [8, 9]. З підвищенням обсипальності зростає вірогідність

появи на виливках засмічень та ужимін, підвищується шорсткість литої поверхні виливків.

Газопроникність (K) – показник здатності структурованої суміші пропускати через себе повітря. Цей показник розраховують за результатами випробувань ФСС проведених відповідно до ГОСТ 23409.6, використовуючи формулу:

$$K = \frac{V \cdot h}{S \cdot P \cdot \tau}, \quad (1)$$

де V – об'єм (2000 см^3) повітря, що пройшло через зразок за час τ , см^3 ; h – висота (довжина) зразка, см ; S – площа поперечного перерізу зразка, см^2 ; P – тиск повітря під зразком під час проведення його випробувань, Па (г/см^2 або сантиметрів водного стовпа); τ – тривалість проходження 2000 см^3 газу (повітря) через зразок, хв [10].

Газопроникність знижується з підвищенням уявної щільності суміші, розмірів її зерен, зниженням їх фракційної однорідності і т.д.

Міцність на стиск (σ_{CT}), при розтягуванні (σ_P) та на вигин (σ_{BG}) – показники здатності зберігати цілісність виробу (форми, стрижня, зразка) при впливі на нього зовнішнього навантаження стиску (σ_{CT}), розтягування (σ_P) або вигину (σ_{BG}). Від величини міцності сумішей залежні і показники їх обсипальності, податливості, вибивання, придатності до регенерації і т.п.

Міцність ПРС не тільки адгезійно та когезійно залежна, але і залежить від уявної щільності структурованої суміші, вмісту сполучного матеріалу в суміші і його природи, часу перемішування ПРС, способу, умов структурування і т.п. [11...13]. У свою чергу, на адгезійну міцність впливають: поверхневе натягування рідкого скла (РС), стан і вигляд поверхні зерен вогнетривкого наповнювача, модуль пружності силікату натрію (СН) з РС, полярність РС та поверхні зерен вогнетривкого наповнювача тощо [14]. При цьому, зокрема, міжвеличинами міцності на стиск, при розтягуванні та на вигин для самотвердіючих ПРС та ПРС, що структуровані за CO_2 -процесом, існує наступна залежність[2]:

$$\sigma_{CT} = 4 \cdot \sigma_P = 2 \cdot \sigma_{BG}. \quad (2)$$

Робота вибивання (A) – це робота, яку необхідно витратити на вибивання виливків з форм і/або стрижнів з виливків.

Роботу вибивання зразків $\varnothing 50 \times 50$ мм розраховують за методикою ЦНДІТМАШ з використанням формули, Дж [15]:

$$A = a \cdot n, \quad (3)$$

де a – робота одного удару копра (для лабораторного копра мод. 5033А величина $a = 3,09$ Дж); n – кількість ударів копра, необхідне для видалення стрижня з обійми.

Робота вибивання певним чином корелює з показником залишкової міцності структурованих сумішей. Тому, роботу вибивання в ряді випадків оцінюють за величиною остаточної міцності на стиск структурованих сумішей попередньо нагрітих до відповідної температури та охолоджених для досліджень до нормальної (20...25 °С) температури [16].

На величину роботи (залишкову міцність) вибивання виливків з форм та стрижнів з виливків насамперед впливає температура нагрівання ФСС при формуванні виливків, про що, наприклад, свідчать залежності на рис. 1.

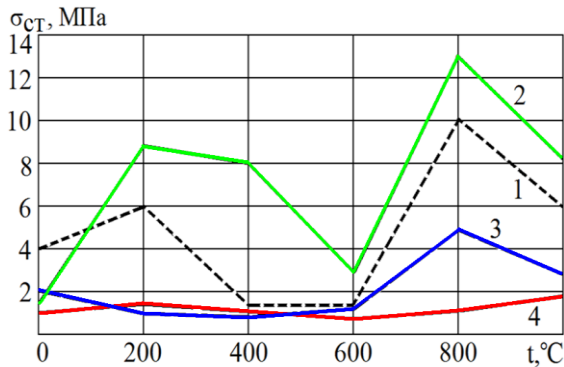


Рисунок 1 – Залежності залишкової міцності на стиск ПРС від температури попереднього нагріву: 1 – 4% РС ($M_{SiO_2}=2,4$), затверджувач – складний ефір; 2 – 6% РС ($M_{SiO_2}=2,4$), затверджувач – CO_2 ; 3 – 5% РС ($M_{SiO_2}=2,6$), затверджувач – 4% ферохромового шлаку; 4 – 6% РС ($M_{SiO_2}=2,7$), затверджувач – 5% ферохромового шлаку (дані А.М. Лясса)

Така закономірність обумовлена проходженням насамперед фізико-хімічних процесів як у глибинних шарах ФСС, так і на поверхнях контакту виливок-(форма/стрижень). В свою чергу, температура нагріву ЛФС залежить від температури заливки розплаву в форму, товщини стінок виливка та стрижня, тривалості заливки розплаву в форму, теплофізичних властивостей сумішей та ін. [17].

Стосовно ПРС, за даними [18...20], робота вибивання буде тим менше, чим менше залишкова

міцність суміші. В свою чергу, залишкова міцність зменшується зі зменшенням вмісту РС в ПРС та з підвищенням силікатного модуля її РС, зі збільшенням залишкових напружень у манжетах РС тощо. Зокрема, П.А. Борсук та А.М. Лясс відзначають, що зниження вмісту РС в ПРС на 1% дозволяє зменшити її залишкову міцність на стиск у 2 рази [18].

Робота вибивання багато в чому залежить і від початкової міцності структурованої суміші. В свою чергу початкова міцність будь-якої структурованої суміші залежить і від механізму (когезійного, адгезійного, змішаного) її руйнування. При цьому, когезійна міцність ФСС, як правило, завжди в рази більше міцності адгезійної [21, 22]. За даними А.М. Лясса ПРС мають когезійний механізм руйнування [21], на думку А.А. Жуковського структуровані ФСС переважно руйнуються за когезійним механізмом і подеколи за змішаним адгезійно-когезійним механізмом [16]. При цьому, перехід від когезійного до адгезійного механізму руйнування може проходити за різних умов, у тому числі, і з підвищенням вмісту сполучного матеріалу у ФСС [23].

Оцінюючи вибиваємість ПРС по їх залишковій міцності на стиск, автори роботи [16] відзначають, що для задовільного вибивання залишкова міцність ПРС на стиск повинна бути у межі 1,5...2,0 МПа, що відповідає роботі вибивання на лабораторному копрі вказаної вище моделі ~100 Дж.

Відносна величина стріли прогину до руйнування (f). Параметр f близький по суті з параметром крихкості (Хр). Чим більше відносна величина стріли прогину до руйнування структурованої суміші, тим суміш в структурованому стані більш піддатлива (менш крихка), тим більш технологічна в структурованому стані, тим менш вразлива до руйнування під час витягання ЛФС з оснащення, маніпуляцій з ЛФС та, за необхідністю, їх обробки лезовим інструментом.

Величину стріли прогину визначають за триточковою схемою навантаження на зразок балочного типу, яка для деяких типів ХТС через 4 та 24 години з моменту завершення їх структурування надана в табл. 1.4.

Таблиця 1
Граничні деформації ХТС при вигині [16]

Сполучна композиція + затверджувач	f, мм, після		Сполучна композиція + затверджувач	f, мм, після	
	4 год.	24 год.		4 год.	24 год.
Смола БС-40 + H_3PO_4	0,59	0,22	РС + шлак + ПАР (РСС)	0,20	0,16
РС + CO_2	0,24	0,18	MgO + H_3PO_4	0,14	0,07
РС + ефір	0,24	0,10	MgO + H_3PO_4 + ПВС	0,32	0,23

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

Як свідчить практика виготовлення ЛФС, відносна величина стріли прогину до руйнування, в основному, залежить від пластичності затверділого сполучного матеріалу суміші, способу структурування суміші та неухильно зменшується з підви-

щенням часу витримки структурованої суміші на повітрі.

Постановка проблеми. Аналіз літературних та патентних даних [19...21, 23...28 і ін.] по визначенню і розрахунку зазначених параметрів ФСС

показує відсутність комплексного підходу в дослідженнях їх взаємозв'язків і взаємного впливу. Тобто в характеристиках сумішей дані параметри і властивості розглядають самостійними і незалежними один від одного, а їх зміни автори відомих залежностей пов'язують лише і, як правило, з природними та техногенне придбаними характеристиками сумішей або їх окремими компонентами [16]. Зокрема, Ребіндер П.О., міцність структурованої суміші рекомендує розраховувати за формулою [16]:

$$\sigma = c^* \cdot \sigma^* \cdot \frac{1 - \Pi}{d_c^2}, \quad (4)$$

де c^* – константа; σ^* – міцність індивідуального контакту (манжети) між частками суміші; Π – відносний об'єм пористості суміші; d_c – середній діаметр часток суміші.

В інших роботах авторами встановлено, що для одних видів структурованих сумішей міцність визначається рівнем адгезійних і когезійних властивостей матеріалів, що входять до них, у інших, наприклад, піщано-глинистих сумішах – Ван-дер-Ваальсовими та капілярними силами, водневими зв'язками і донорно-акцепторною взаємодією і т.д. [7, 13, 14]. При цьому міцність структурованої суміші вони також розраховують за формулами, використовуючи параметри, що подібні за змістом до параметрів формули (4). Зокрема, в роботі [15], для математичного опису впливу вмісту сполучного ФСС (x) на властивості ЛФС автори використовують рівняння виду:

$$y = a + b \cdot x + c \cdot x^2, \quad (5)$$

де a, b, c – коефіцієнти кореляції.

В роботі [16] Жуковський С.С. відносно залежностей типу (5) відмічає, що такі емпіричні залежності мало що додають до нових уявлень про досліджувані процеси та матеріали. Тобто, виключно такий формалізований підхід до вирішення не тільки проблеми міцності, але і будь-якого параметру знижує точність прогнозу, унеможлиблює проведення комплексного аналізу та прогнозування зміни основних властивостей структурованих сумішей при виникненні значних збурень в технологічному процесі виготовлення ЛФС.

Такий стан питання підвищує вірогідність суттєвих втрат при виготовленні виливків та литих деталей, що потребує відповідних досліджень та розробки адекватних розгорнутих функціональних залежностей між показниками ФСС, зокрема, на основі ПРС.

Мета і завдання досліджень. Мета роботи – розробити методіку розрахунку властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. Завдання дослідження – розрахувати властивості піщано-рідкоскляних сумішей за теоретичними формула-

ми, що отримані та адаптовані за експериментальними даними.

Матеріали та методика досліджень. Для встановлення загальної структури передбачуваної залежності між обраними параметрами, заснованої тільки на інваріантності фізичної залежності при зміні масштабів одиниць, використовували π -теорему аналізу розмірностей. З цією метою припустили, що між n даних фізичних величин (відібраних параметрів) існує якась залежність, у якій вид постійний навіть при зміні масштабів одиниць в деякому класі систем одиниць. Тобто, вона еквівалентна залежності між меншим числом $p = n - k$ безрозмірних величин, де k – найбільше число величин з незалежними розмірностями серед вихідних n величин.

Результати досліджень. З метою прогнозування властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі (ПМЗ-процес) використовували формули та результати робіт [29, 30]. При цьому припускали, що якщо прийняти, що всі частинки піску мають сферичну форму діаметром d , то в об'ємі піску (V), наприклад, 1 м^3 , при кубічній або ромбічній схемі укладання піщинок або їх конгломератів питомої площі їх поверхні можна розрахувати за відомою формулою, $\text{м}^2/\text{м}^3$:

$$S_{\Pi} = 6 \cdot \frac{1 - m}{d \cdot V}, \quad (6)$$

де m – об'ємна частка пор у піску в частках одиниці; d – діаметр піщинок або їх конгломератів, м.

Якщо прийняти, що ρ і ρ_2 , відповідно, уявна щільність кварцового піску і дійсна щільність кварцу ($\rho_2 = 2650 \text{ кг/м}^3$), то, прийнявши $V = 1 \text{ м}^3$, формулу (6) можна записати у вигляді:

$$S_{\Pi} = 6 \cdot \frac{\rho}{d \cdot 2650} = \frac{0,002265 \cdot \rho^*}{d}. \quad (7)$$

В першому наближенні як величину d приймемо середній діаметр частинок піску, який передбачається використати в ПРС. В цьому випадку межу міцності при стисканні структурованої ПРС розраховуємо за формулою:

$$\sigma_{CT} = f_{\sigma} \cdot \rho \cdot \frac{V_{CB}}{S_{\Pi}} = f_{\sigma} \cdot \frac{\rho}{\rho_{CB}} \cdot \frac{m_{CH}}{S_{\Pi}}, \quad (8)$$

де S_{Π} – питома площа поверхні зернистої складової (кварцового піску) структурованої суміші, м^2 ; m_{CH} – маса силікату натрію від РС, що планується використати на плакування кварцового піску:

$$m_{CH} = \varphi_{CH} \cdot m_{PC} \cdot \rho \quad (9)$$

де φ_{CH} – масова доля силікату натрію в РС (для розрахунків прийнято $\varphi_{CH} = 0,45$) або, прийнявши:

$$f_{\sigma} = 6500 \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right)^2,$$

де ρ^* – максимальна уявна щільність, притаманна виключно для даного кварцового піску, за формулою ($\rho^*=1937 \text{ кг/м}^3$):

$$\sigma_{CT} = 65000 \cdot \frac{(\rho)^3}{(\rho^*)^2 \cdot \rho_{CB}} \cdot \frac{m_{CB}}{S_{II}}, \quad (10)$$

або, з урахуванням (7), виключно для даної ПРС знаходимо, МПа:

$$\sigma_{CT} = 2870800 \left(\frac{\rho}{\rho^*} \right)^2 \cdot \frac{m_{CB}}{\rho_{CB}} \cdot d, \quad (11)$$

Газопроникність (К) – це показник здатності зразка структурованої суміші відповідної форми пропускати через себе повітря, який розраховують за результатами досліджень, виконаних за ГОСТ 23409.6.

Результати визначення газопроникності ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом, від уявної щільності, приведені в табл. 2, а графічна залежність $K=f(\rho)$, щоприведена на рис. 2, може бути описана формулою (12).

Таблиця 2

Експериментальні дані уявної щільності та газопроникності структурованих ПРС

$\rho, \text{ кг/м}^3$	1224	1768	1710	1392	1657	1727	1465
K, од	405	152	282	308	238	151	364
$\rho, \text{ кг/м}^3$	1290	1551	1724	1709	1747	1543	1575
K, од	365	239	153	158	198	303	262
$\rho, \text{ кг/м}^3$	1514	1300	1490	1555	1644	1371	1700
K, од	333	375	328	325	250	377	202

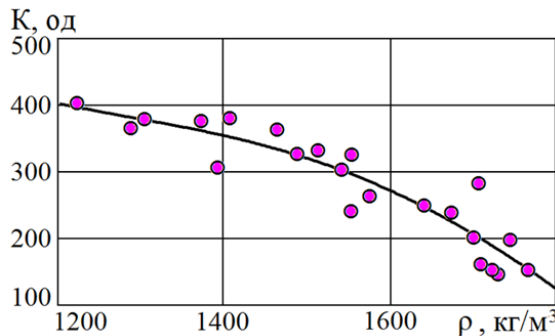


Рисунок 2–Залежність газопроникності ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом, від її уявної щільності

$$K=86 \cdot 10^{-10} \cdot \rho^4 - 5253 \cdot 10^{-8} \cdot \rho^3 + 0,11899 \cdot \rho^2 - 118,96 \cdot \rho + 44759, \quad (12)$$

де К – газопроникність структурованої суміші, од; ρ – уявна щільність структурованої ПРС, кг/м^3 .

За результатами порівняльного аналізу експериментальних і розрахункових величин до розрахунків приймемо межі зміни величини газопроникності від (-30) до (+60) одиниць відносно до значень, розрахованих за формулою (12).

Уявну щільність ПРС, що складається з кварцового піску з округлою формою частинок залежно від відносної маси РС щільністю 1420...1440 кг/м^3 , використаного на його плакування, розраховуємо за формулою:

$$\rho=950-570 \cdot \ln(d), \quad (13)$$

Щільність затверділого сполучного матеріалу для розрахунків приймемо рівною $\rho_{CB}=2440 \text{ кг/м}^3$

Припустимо, що для виготовлення будь-якого гіпотетичного стрижня за ПМЗ-процесом використовують кварцовий пісок з середнім розміром часток 0,25 мм, що плакований рідким склом у кількості 1,5% понад 100% маси кварцового піску.

В цьому випадку після сушіння такого піску до сипучого стану, відповідного помелу та вібраційного ущільнення в оснащенні, відповідно до формули (13), величина уявної щільності цієї структурованої ПРС складе:

$$\rho=950-570 \cdot \ln(0,25)=1740 \text{ кг/м}^3 \text{ (експериментальне значення – } 1727 \text{ кг/м}^3\text{)}.$$

Газопроникність такої структурованої ПРС, відповідно до формули (12), складе:

$$K=86 \cdot 10^{-10} \cdot 1740^4 - 5253 \cdot 10^{-8} \cdot 1740^3 + 0,11899 \cdot 1740^2 - 118,96 \cdot 1740 + 44759=124 \text{ од} \text{ (експериментальне значення – } 151 \text{ од)}.$$

Для прийнятої ПРС маса силікату натрію в 1 м³ суміші становить:

$$m_{CH} = 0,45 \cdot 0,015 \cdot 1740 = 11,745 \text{ кг}$$

В цьому випадку, межа міцності на стиск такої суміші, відповідно до формули (11), повинна становити, МПа:

$$\sigma_{CT} = 2870800 \cdot \left(\frac{1740}{1927}\right)^2 \cdot \frac{11,745}{2440} \cdot 0,00025 = 2,82.$$

(експериментальне значення – 2,95 МПа)

Функціональні залежності між властивостями зразків з структурованих формувальних і стрижневих сумішей розраховували за формулами роботи [29], у числі яких:

обсипальність:

$$O_c = f_0 \cdot \rho^3 \cdot l \cdot \frac{K}{\sigma_{CT}}, \quad (14)$$

де l – довжина зразка ($l=0,05$ м); $f_0 = 21 \cdot 10^{-12}$.
стріла прогину зразка балочного типу:

$$\Delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{l} = f_\varepsilon^* \cdot \rho^2 \cdot \frac{K}{O_c}, \quad (15)$$

де l – довжина зразка ($l=0,2$ м); $f_\varepsilon = 19 \cdot 10^{-11}$.
робота вибивання:

$$A = f_A \cdot K^2 \cdot \sigma_{CT}^2 \cdot \rho \cdot l, \quad (16)$$

де l – довжина зразка ($l=0,05$ м), м; $f_A = 56 \cdot 10^{-7}$.

У зв'язку з тим, що показник газопроникності K має певні межі щодо його зміни, обсипальність, стріла прогину зразка балочного типу та робота вибивання ПРС також набувають мінімальних та максимальних значень. Тобто:

$$O_c = 21 \cdot 10^{-12} \cdot 1740^3 \cdot 0,05 \cdot \frac{124}{2,82} = 0,24.$$

(експериментальне значення $O_c = 0,26$ %)

$$\Delta_\varepsilon = 19 \cdot 10^{-11} \cdot 1740^2 \cdot \frac{124}{0,24} = 0,30.$$

(експериментальне значення $\Delta_\varepsilon = 0,32$ %)

$$A = 56 \cdot 10^{-7} \cdot 124^2 \cdot 2,82^2 \cdot 0,05 \cdot 1740 = 60.$$

(експериментальне значення $A = 92$ Дж)

Обговорення результатів. Аналіз результатів прогнозування властивостей досліджуваних ПРС свідчить про їх адекватність, щодо результатів експериментальних вимірювань параметрів, а розроблена методика прогнозування адаптована і може бути рекомендована для прогнозування властивостей ПРС з кварцового піску з середнім розміром часток 0,16...0,315 мм, які плаковані натрієвим рідким склом щільністю 1420...1440 кг/м³ і силікатним модулем 2,8...3,0 в кількості 0,5...2,5 % понад 100% кварцового піску, що структуровані в паромікрохвильовому середовищі з використанням мікрохвильової печі з обертовим столом та магнетроном потужністю 700...900 Вт.

Підвищити точність прогнозування за розробленою методикою можливо шляхом підвищення точності розрахунків або експериментального визначення за ГОСТ 23409.6 величини газопроникності реально структурованої ПРС.

Висновки. Використання даної методики розрахунків властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих за ПМЗ-процесом, дозволить підвищити точність аналізів і прогнозування властивостей сумішей. Тобто при зміні хоча б одного компонента суміші, використання даної методики дозволить розрахувати властивості суміші і, при необхідності, відповідним чином змінити склад суміші, скорегувати відповідні технологічні параметри виробництва формувальних та стрижневих сумішей, зменшити витрати на процес оптимізації складу цих сумішей.

Бібліографічний опис

1. Chate G.R., Chate G.C., Manjunath P., BharathBhushan S.N., Mahesh B.P., Anand S.D. Comprehensive modelling, analysis and optimization of furan resin-based moulding sand system with sawdust as an additive. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019. № 4. Pp. 1-24. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1684-0>
2. Major-Gabryś K., Mosadyna-Kondracka M., Grabarczyk A. Selection of hardening technology of moulding sand with hydrated sodium silicate binder devoted to aluminum alloys ablation casting. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2019. № 1. Pp. 359-364. <https://doi.org/10.24425/amm.2019.126260>
3. Юрасов В.В., Сильченко Т.Ш., Кидалов Н.А. Разработка жидкостекольного связующего для смесей литейного производства из нанодиспергированных ударно-волновой обработкой щелочных силикатов натрия. *Литейщик России*. 2011. № 2. С. 42-46.
4. Афонаскин А.В., Быстров М.В., Чуркин Б.С., Брусницын С.В. Составы смесей, обеспечивающие высокую податливость и выбиваемость стержней. *Литейное производство*. 2011. № 3. С. 8-10.
5. Кукарцев В.А., Дроздова Т.Н., Кукарцев В.В., Атрошенко А.В. Использование отвалов отработанной жидкостекольной смеси при изготовлении форм. *Литейное производство*. 2015. № 5. С. 6-8.
6. Иванова Л.А., Наумов В.И., Чернышов Е.А., Кузнецов С.А. Свойства жидкостекольных смесей при модифицировании жидкого стекла ПАВ. *Литейное производство*. 2015. № 8. С. 6-9.

7. Иванова Л.А., Чернышов Е.А., Кузнецов С.А. Влияние комплексного модификатора на остаточную прочность жидкостекольных смесей. *Литейное производство*. 2016. № 11. С. 16-18.
8. Яшина С.А., Клюквина Т.Д. Изучение механизма осыпаемости самотвердеющих смесей (обзор). *Труды ВИАМ*. 2018. №6(66). С. 110-118.
9. Кукуй Д.М., Андрианов Н.В. Теория и технология литейного производства формовочные материалы и смеси. Искусственная сушка горных пород: Учебн. пособие. Мн.: БНТУ, 2005. 360 с.
10. Лютий Р.В., Гурія І.М. Формувальні матеріали: підручник для студ. спеціальності 136 «Металургія». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 258 с.
11. Дан Л.А., Трофимова Л.А., Шепилов В.А., Дан Е.Л. Повышение прочностных свойств сырых песчано-глинистых формовочных смесей путем электромагнитной обработки воды. *Вісник приазовського державного технічного університету*. 2012. № 24. С. 143-147.
12. Фесенко А.Н., Фесенко М.А., Федоров Н.Н. Влияние влажности и зернистости песка на основе кварца на свойства песчано-глинистой формовочной смеси. *Научный вестник ДГМА*. 2017. №1 (22). С. 104-111.
13. Рагимов К.Э. Промышленное испытание противопригарных свойств формовочных и стержневых смесей с техногенными отходами. *Системные технологии*. 2015. № 4(99). С. 49-55.
14. Илларионов И.Е., Петрова Н.В. Жидкостекольные смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом. *Труды Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева*. 2011. № 2(87). С. 208-213.
15. Бречко А.А., Великанов Г.Ф. Формовочные смеси с заданными свойствами. Л.: Машиностроение, 1982. 216 с.
16. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. М: Машиностроение, 1989. 288 с.
17. Марков В.А., Нефедов К.Е. Метод определения выбиваемости жидкостекольных смесей. *Ползуновский альманах*. 2003. № 4. С. 50-51.
18. Борсук Л.А., Лясс А.М. Жидкие самотвердеющие смеси. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
19. Жуковский С.С., Иванов А.А. Упрочнение и выбиваемость жидкостекольных смесей. *Литейное производство*. 1987. №1. С. 9-11.
20. Жуковский С.С. Проблемы прочности формовочных смесей. *Литейное производство*. 1985. №5. С. 5-7.
21. Лясс А.М. Быстротвердеющие формовочные смеси. М.: Машиностроение, 1965. 329 с.
22. Васин Ю.П., Васина З.М. Адгезионные свойства поверхности зёрен кварцевого песка. *Вопросы теории и технологии литейных процессов*. Челябинск: ЧПИ, 1981. С.3-6.
23. Жуковский С.С., Кузнецов Д.А. Упрочнение холоднотвердеющих смесей силанами. *Литейное производство*. 1984. №9. С. 18-19.
24. Великанов Г.Ф., Бречко А.А. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами. Л.: Машиностроение, 1982. 214 с.
25. Зыков А.П., Минаев Г.И. Механизм формирования прочностных свойств песчано-смоляных образцов из горячеплакированных смесей. *Литейное производство*. 1984. №1. С. 15-16.
26. Смесь для литейных форм: а.с. 1256844 СССР: МКл В22 С1/00, С1/02. №3851355/22-02; заявл. 31.01.85; опубл. 15.09.86, Бюл. №34. 3 с.
27. Смесь для литейных форм и стержней: а.с. 372014 СССР: МКл В22 С1/00. №1294117/22-2; заявл. 06.01.69; опубл. 01.03.73, Бюл. №13. 1 с.
28. Состав смеси для изготовления литейных форм и стержней: а.с. 1227309 СССР: МКл В22 С1/02. № 3847025/22-02; заявл. 21.11.84; опубл. 30.04.86, Бюл. № 16. 4 с.
29. Солоненко Л.І., Білий О.П., Узлов К.І. Функціональні залежності між властивостями зразків з структурованих формувальних і стержневих сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6. С. 93-100. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tipm_2018_6_14.
30. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І. Оптимізація зернового складу піщано-рідкоскляних сумішей для структуровання способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2021. №1. С. 28-38. <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2021.05>

Reference

1. Chate G.R., Chate G.C., Manjunath P., Bharath Bhushan S.N., Mahesh B.P., Anand S.D. Comprehensive modelling, analysis and optimization of furan resin-based moulding sand system with sawdust as an additive. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019. № 4. Pp. 1-24. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1684-0>
2. Major-Gabryś K., Mosadyna-Kondracka M., Grabarczyk A. Selection of hardening technology of moulding sand with hydrated sodium silicate binder devoted to aluminum alloys ablation casting. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2019. № 1. Pp. 359-364. <https://doi.org/10.24425/amm.2019.126260>
3. Yurasov V.V., Silchenko T.Sh., Kidalov N.A. Development of a liquid-glass binder for foundry mixtures from sodium alkali silicates nanodispersed by shock-wave processing. *Russian foundry worker*. 2011. № 2. Pp. 42-46.
4. Afonaskin A.V., Bystrov M.V., Churkin B.S., Brusnitsyn S.V. Compositions of mixtures providing high ductility and knock-out of rods. *Foundry*. 2011. № 3. Pp. 8-10.
5. Kukartsev V.A., Drozdova T.N., Kukartsev V.V., Atroschenko A.V. The use of dumps of waste liquid glass mixture in the manufacture of molds. *Foundry*. 2015. № 5. Pp. 6-8.
6. Ivanova L.A., Naumov V.I., Chernyshov E.A., Kuznetsov S.A. Properties of liquid glass mixtures in the modification of liquid glass with surfactants. *Foundry*. 2015. № 8. Pp. 6-9.
7. Ivanova L.A., Chernyshov E.A., Kuznetsov S.A. Influence of a complex modifier on the residual strength of liquid glass mixtures. *Foundry*. 2016. № 11. Pp. 16-18.
8. Yashina S.A., Klyukvina T.D. Study of the mechanism of shedding of self-hardening mixtures (review). *Proceedings of VIAM*. 2018. № 6 (66). Pp. 110-118.

9. Kukuy D.M., Andrianov N.V. Theory and technology of foundry production molding materials and mixtures. Artificial drying of rocks: Textbook. Allowance. Minsk: BNTU, 2005. 360 p.
10. Lyuty R.V., Guria I.M. Molding materials: handbook for students. specialty 136 "Metallurgy". Kiev: KPI im. Igor Sikorsky, 2020. 258 p.
11. Dan L.A., Trofimova L.A., Shepilov V.A., Dan E.L. Improving the strength properties of raw sand-clay molding sands by electromagnetic water treatment. *Bulletin of the Azov State Technical University*. 2012. № 24. Pp. 143-147.
12. Fesenko A.N., Fesenko M.A., Fedorov N.N. Influence of humidity and granularity of sand based on quartz on the properties of sand-clay sand. *Scientific Bulletin of the DSEA*. 2017. № 1 (22). Pp. 104-111.
13. Ragimova K.E. Industrial testing of non-stick properties of molding and core sands with industrial waste. *System technologies*. 2015. № 4(99). Pp. 49-55.
14. Illarionov I.E., Petrova N.V. Liquid glass mixtures cured by blowing with carbon dioxide. *Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev*. 2011. № 2(87). Pp. 208-213.
15. Brechko A.A., Velikanov G.F. Molding sands with desired properties. L.: Mashinostroenie, 1982. 216 p.
16. Zhukovsky S.S. Mold strength. M.: Mashinostroenie, 1989. 288 p.
17. Markov V.A., Nefedov K.E. Method for determining the knockout of liquid glass mixtures. *Polzunov almanac*. 2003. № 4. Pp. 50-51.
18. Borsuk L.A., Lyass A.M. Liquid self-hardening mixtures. M.: Mashinostroenie, 1979. 255 p.
19. Zhukovsky S.S., Ivanov A.A. Hardening and knockout of liquid glass mixtures. *Foundry*. 1987. № 1. Pp. 9-11.
20. Zhukovsky S.S. Problems of the strength of molding sands. *Foundry*. 1985. № 5. Pp. 5-7.
21. Lyass A.M. Fast hardening sands. M.: Mashinostroenie, 1965. 329 p.
22. Vasin Yu.P., Vasina Z.M. Adhesive properties of the surface of grains of quartz sand. *Questions of theory and technology of foundry processes*. Chelyabinsk: ChPI, 1981. P.3-6.
23. Zhukovsky S.S., Kuznetsov D.A. Strengthening of cold hardening mixtures with silanes. *Foundry*. 1984. № 9. Pp. 18-19.
24. Velikanov G.F., Brechko A.A. Molding and core mixtures with specified properties. L.: Mashinostroenie, 1982. 214 p.
25. Zykov A.P., Minaev G.I. Mechanism of formation of strength properties of sand-resin specimens from hot-clad mixtures. *Foundry production*. 1984. № 1. Pp. 15-16.
26. Mix for casting molds: a.s. 1256844 USSR: MKI B22 S1/00, S1/02. No. 3851355/22-02; dec. 01/31/85; publ. 09/15/86, Bull. № 34. 3 p.
27. Mixture for casting molds and cores: a.s. 372014 USSR: MKI B22 C1/00. No. 1294117/22-2; dec. 01/06/69; publ. 01.03.73, Bull. № 13. 1 p.
28. The composition of the mixture for the manufacture of molds and cores: a.s. 1227309 USSR: MKI B22 C1/02. No. 3847025/22-02; dec. 11/21/84; publ. 04/30/86, Bull. № 16. 4 p.
29. Solonenko L.I., Bily O.P., Uzlov K.I. Functional fallows between power structures and structuring molding and shearing sums. *Theory and practice of metallurgy*. 2018. № 6. Pp. 93-100. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tipm_2018_6_14
30. Solonenko L.I., Rep'yakh S.I., Uzlov K.I. Optimization of the grain storage of spicy-red-coloured sums for structuring by the method of steam-micro-fluff hardening. *Theory and practice of metallurgy*. 2021. №1. Pp. 28-38. <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2021.05>