

**Л.І. Солоненко<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, доц., проф. каф. цивільної безпеки та охорони праці,

e-mail: solonenkoli14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

**С.І. Реп'ях<sup>2</sup>**, д-р техн. наук, проф., проф. каф. ливарного виробництва, e-mail: 123rs@ua.fm,

<https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>

**О.П. Білий<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, доц., доц. каф. ливарного виробництва, e-mail: baplitvo@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0003-1234-5404>

<sup>1</sup>Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

<sup>2</sup>Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

## Регенерація та альтернативне використання відпрацьованих піщано-рідкоскляних сумішей, які структуровані дегідратацією рідкого скла

**Актуальність.** Актуальність роботи обумовлена необхідністю зниження екологічного навантаження, зумовленого відпрацьованими формувальними сумішами ливарного виробництва, та розроблення високоефективних низькоенерговитратних ресурсозберігаючих технологій їх регенерації.

**Отримані результати.** Встановлено, що водостійкість піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані за рахунок дегідратації, має інверсійний характер залежності від вмісту рідкого скла та тривалості ПМЗ-структурування, що обумовлено конкуренцією процесів формування та дегідратації силікатних манжет. Показано, що руйнування структури у воді має дифузійно-кінетичну природу і визначається температурою, об'ємом води та вмістом зв'язувального. Запропоновано параметр  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ , який узагальнює вплив складу та режимів структурування на властивості системи. Встановлено, що міцність, водостійкість і тривалість гідрорегенерації описуються монотонними експоненційними залежностями з асимптотичним виходом на насичення від параметра  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ . Отримано аналітичну модель для оцінки витрати нейтралізуючого реагенту з похибкою не більше 10 %. Показано можливість ефективної гідрорегенерації з обмеженим об'ємом води та повторного використання суміші.

**Наукова новизна.** Вперше введено узагальнений безрозмірний параметр  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ , який інтегрує кількість рідкого скла та ступінь його дегідратації і визначає структурний стан піщано-рідкоскляної суміші, що структурована за рахунок дегідратації, та комплекс її властивостей. Встановлено єдину закономірність взаємозв'язку між міцністю, водостійкістю та тривалістю гідрорегенерації через параметр  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ , що інтерпретується як перколяційного типу перехід у структурі міжзеренного силікатного каркаса.

**Практичне значення.** Отримані результати дозволяють оптимізувати режими ПМЗ-структурування і гідрорегенерації піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані за рахунок дегідратації, забезпечуючи зниження витрат води, енергії та зв'язувального при збереженні рівнів необхідних їм технологічних властивостей.

**Ключові слова:** піщано-рідкоскляні суміші, гідрорегенерація, водостійкість, силікатні манжети, дегідратація, ресурсозбереження, вторинна сировина.

**Вступ.** У сучасних умовах розвитку ливарного виробництва проблема поводження з відпрацьованими формувальними сумішами набуває системного характеру, поєднуючи технологічні, ресурсні та екологічні

аспекти. Витрата формувального піску у ливарному виробництві, залежно від типу зв'язувальних систем і технології структурування, може у декілька разів перевищувати масу отриманого литва, що зумовлює формування значних обсягів відпрацьованих

матеріалів [1—3].

Згідно із сучасною ієрархією поводження з відходами, закріпленою у концепції циркулярної економіки, пріоритет надається запобіганню утворенню відходів порівняно з їх переробкою або захопленням, що забезпечує мінімізацію техногенного навантаження на довкілля [4, 5]. У цьому контексті принципово важливим є не лише вдосконалення методів регенерації, але й встановлення факторів, що визначають саму можливість ефективного руйнування формувальних сумішей після їх використання.

Екологічні ризики, пов'язані з відпрацьованими формувальними сумішами, мають комплексний характер і включають як безпосереднє забруднення ґрунтів і вод унаслідок вилуговування компонентів зв'язувальних систем [6—8], так і опосередкований вплив через необхідність постійного відновлення запасів кварцового піску, що супроводжується деградацією природних екосистем і порушенням ландшафтів [9—12].

Водночас аналіз показує, що зазначені екологічні наслідки є похідними від структурних особливостей формувальних сумішей, які визначають їх механічну міцність, водостійкість та здатність до руйнування. Саме структурний стан зв'язувальної фази є тим ключовим фактором, який одночасно визначає як експлуатаційні властивості сумішей, так і ефективність їх подальшої регенерації.

У зв'язку з цим перспективним напрямом є не стільки інтенсифікація вже існуючих методів регенерації, скільки керування процесами формування структури таким чином, щоб забезпечити поєднання необхідної міцності форм у робочому стані з їх здатністю до контрольованого руйнування після використання. Такий підхід дозволяє розглядати формувальні суміші як керовані структурні системи, властивості яких можуть бути цілеспрямовано адаптовані.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених формувальним матеріалам, відсутні узагальнені кількісні підходи, які дозволяють пов'язати параметри структурування з кінетикою руйнування та ефективністю регенерації. Особливо це стосується систем, в яких структура формується за рахунок дегідратації зв'язувальної фази, де визначальну роль відіграють кінетичні фактори тепломасопереносу.

**Постановка проблеми.** На сьогодні регенерацію піску з відпрацьованих формувальних сумішей розглядають як багатостадійний процес, що включає механічні, термічні та хімічні методи впливу на зв'язувальну речовину [13]. При цьому ефективність регенерації визначають не лише за типом зв'язувального, але й морфологією та структурним станом зв'язувальної фази.

Для неорганічних зв'язувальних систем, зокрема піщано-рідкоскляних сумішей, процес структурування пов'язаний із полімеризацією силікатних аніонів і формуванням просторової сітки Si—O—Si зв'язків, що супроводжується переходом від розчинного стану до гелеподібної та твердої фаз [14, 15]. Кінетика цього

процесу визначається співвідношенням швидкості дегідратації та дифузійної рухливості компонентів, що обумовлює ступінь полімеризації і щільність сформованої структури.

Встановлено, що морфологія силікатної фази суттєво впливає на процеси руйнування. Зокрема щільні малорозчинні плівки, сформовані на поверхні зерен піску, істотно ускладнюють їх видалення при регенерації [16], тоді як більш пористі та структурно менш впорядковані утворення руйнуються значно легше.

Процеси гідрорегенерації є гетерогенними і включають поєднання фізико-хімічного розчинення, дифузійного масопереносу та механічного руйнування. Руйнування силікатної пористої фази має багатостадійний характер: на початковій стадії відбувається вилуговування лужних компонентів, що дестабілізує структуру, після чого реалізується повільніша стадія руйнування кремнеземної сітки [17, 18]. У щільних силікатних структурах процес переходить у дифузійно-контрольований режим, що обмежує швидкість регенерації [19].

Незважаючи на існування ефективних методів інтенсифікації регенерації, включаючи гідротермальні та хімічні підходи, їх застосування супроводжується значними енерговитратами та утворенням вторинних відходів [20, 21]. Це свідчить про те, що проблема регенерації не може бути вирішена виключно за рахунок посилення зовнішніх впливів, а потребує оптимізації внутрішньої структури матеріалу.

Особливий інтерес становлять піщано-рідкоскляні суміші, що структуровані за рахунок дегідратації (ПРС-д), оскільки в цьому випадку структура формується внаслідок кінетично керованих процесів, що відкриває можливість її цілеспрямованого регулювання. У цьому контексті перспективним є використання ПРС-д паро-мікрохвильового структурування, яке поєднує інтенсивний тепломасоперенос і об'ємний нагрів, що дозволяє формувати структури з принципово іншою морфологією силікатної фази порівняно з традиційними методами дегідратації. Однак закономірності формування таких структур та їх вплив на процеси руйнування і регенерації залишаються практично недослідженими.

Аналіз літературних джерел свідчить, що більшість досліджень зосереджена на підвищенні міцності формувальних сумішей, зниженні газовиділення та удосконаленні технологій регенерації [22, 23]. Водночас на сьогодні відсутні узагальнені підходи, які дозволяють:

— кількісно описати ступінь структурної реалізованості силікатної фази;  
— встановити взаємозв'язок між структурою, водостійкістю та кінетикою руйнування;  
— прогнозувати ефективність гідрорегенерації залежно від умов структурування.

Крім того, перспективним напрямом є використання відпрацьованих ПРС-д як вторинної сировини для синтезу силікатних матеріалів, зокрема, для виготовлення силікат-брили, що дозволяє підвищити ступінь утилізації її силікатної складової [24—26].

Таким чином, існує необхідність у розробці підходів, що дозволяють пов'язати умови формування структури піщано-рідкоскляних сумішей із кінетикою її руйнування та ефективністю регенерації.

**Мета роботи.** Встановлення кількісних закономірностей процесів гідрорегенерації відпрацьованих піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих дегідратацією, на основі аналізу взаємозв'язку між параметрами структурування, морфологією силікатної фази та кінетикою її руйнування, а також обґрунтування можливості їх використання як вторинної силікатвмісної сировини.

**Об'єкт дослідження.** Об'єкт дослідження — піщано-рідкоскляна суміш, яка плакована від 0,5 до 4 % (понад 100 % піску, за масою) натрієвим рідким склом та структурована у паро-мікрохвильовому середовищі.

**Методика дослідження.** У дослідженнях використовували кварцовий пісок марки 1К<sub>2</sub>О<sub>2</sub>02, натрієве рідке скло з силікатним модулем 2,9 та щільністю 1,4 г/см<sup>3</sup>, сиру та кип'ячену водопровідну воду, 20 % розчин сірчаноокислого алюмінію (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O) у воді.

Піщано-рідкоскляну суміш виготовляли з кварцового піску, який попередньо плакували від 0,5 до 4 % (понад 100% піску, за масою) натрієвим рідким склом та висушували на повітрі при 25...30 °С (до сипучого стану) при постійному перемішуванні. Після сушіння плакований кварцовий пісок просіювали через сито з коміркою 0,4 мм. Виготовлення досліджуваних зразків проводили шляхом ущільнення сухого плакованого піску вібрацією з подальшою обробкою впродовж 3 хв у паро-мікрохвильовому випромінюванні (за процесом паро-мікрохвильового затвердіння — ПМЗ [27]) з використанням водяного заряду за методикою роботи [28].

Охолоджені на повітрі до кімнатної температури зразки кубічної форми з величиною ребра 20±1 мм використовували задля іспитів за наступними схемами:

Схема 1 — зразки витримували у воді з незмінною температурою 40 та 80 °С, фіксуючи за секундоміром час до їх повного руйнування під дією власної маси. Мета досліджень за схемою 1 — встановлення впливу температури води та маси рідкого скла у структурованій ПРС-д на відносний час її руйнування під власною масою.

Схема 2 — зразки просочували водою з вихідною температурою 22 °С, фіксуючи за секундоміром час до їх повного руйнування під тиском 0,018 МПа. Мета досліджень за схемою 2 — встановлення впливу маси рідкого скла у структурованій ПРС-д на час руйнування під тиском.

Схема 3 — зразки обмежений час витримували у воді з вихідною температурою 22, 62 та 99 °С з перемішуванням повністю зруйнованих зразків один раз на 30...45 хв, зливали з піску надлишкову воду, висушували пісок, просіювали його через сито з коміркою 0,4 мм, ущільнювали вібрацією та вторинно структурували у паро-мікрохвильовому середовищі впродовж 3 хв, після чого вимірювали їх

міцність на стиск. Мета досліджень за схемою 3 — встановлення впливу часу гідрорегенерації, вихідної температури води та її кількості на міцність на стиск вторинно-структурованих ПРС-д у мікрохвильовому середовищі.

Схема 4 — зразки обмежений час витримували у воді з вихідною температурою 22, 62 та 99 °С з перемішуванням повністю зруйнованих зразків один раз на 30...45 хв, зливали з піску надлишкову воду і нейтралізували її 20 % водним розчином сірчаноокислого алюмінію (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O) у кількості (за масою) до досягнення у воді водневого показника рН≈7. Мета досліджень за схемою 4 — встановлення впливу умов проведення гідрорегенерації на кількість 20 % водного розчину сірчаноокислого алюмінію, витраченого для нейтралізації стічної води.

Схема 5 — зразки витримували на повітрі 10, 20, 30 та 32 доби влітку при температурі 20...23 °С та відносній вологості 40±3 % та взимку при температурі повітря -6...-8 °С та відносній вологості 80±4 %. Після витримки зразки занурювали у водопровідну воду з температурою 23 °С (співвідношення маси зразка до маси води 1:2) та фіксували час до їх повного руйнування під власною масою. Мета досліджень за схемою 5 — встановлення впливу тривалості витримки у природних умовах (навколишньому середовищі) структурованих ПРС-д на час їх руйнування у воді (здатності до гідрорегенерації).

Температуру повітря та води виміряли ртутним термометром з точністю ±0,5 °С, час фіксували за показниками електронного годинника. Величину водневого показника оцінювали за приблизним колориметричним методом з використанням тест-смужки та відповідною кольоровою шкалою. Міцність на стиск вимірювали за результатами руйнування зразків на приладі моделі LRu-2e.

**Результати дослідження.** У роботі [29], відповідно до прийнятої в ній методики досліджень (схема досліджень № 1), величину відносної тривалості руйнування зразків у воді (водостійкість) автори розраховували за формулою:

$$\nabla = \tau_i / \tau_1, \quad (1)$$

де  $\tau_i$  — тривалість руйнування *i*-го зразка у воді, с;  $\tau_1$  — тривалість руйнування у воді з температурою 80 °С референтного зразка ПРС-д, що має вміст рідкого скла 0,5 % (за масою) і структурована за ПМЗ-процесом протягом 2 хв ( $\tau_1 = 94$  с).

Фізичний зміст формули (1) — це відносна (нормована) водостійкість, яка дозволяє порівнювати різні склади ПРС-д незалежно від абсолютних значень.

Залежність відносної тривалості руйнування структурованої ПРС-д у воді з температурою 80 °С (а) і 40 °С (б) від часу структурування і кількості рідкого скла (РС) (*m*), яким плакували кварцовий пісок в ПРС-д, при співвідношенні маси ПРС-д до маси води ~ 1/50 схематично представлена на рис. 1.

Аналіз залежностей, наведених на рис. 1, свідчить про наявність інверсії відносної тривалості руйнування суміші у воді при зміні вмісту рідкого скла. Такий

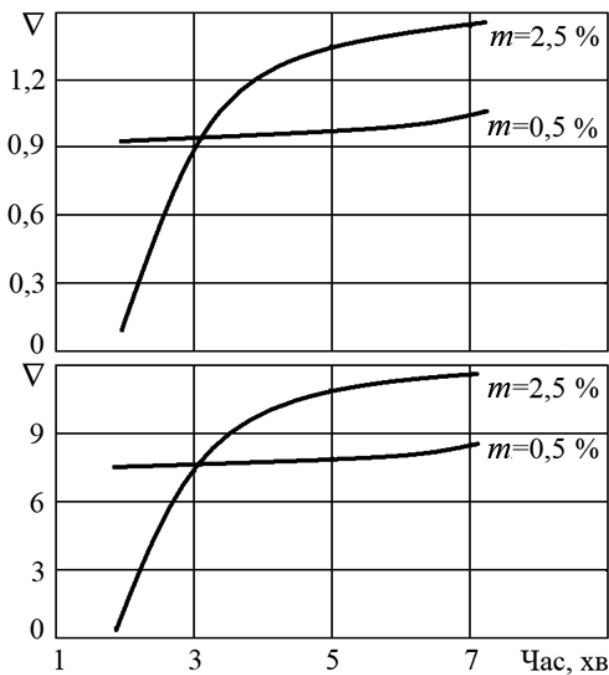


Рис. 1. Залежність відносної тривалості руйнування структурованої суміші у воді з температурою 80 °С (а) і 40 °С (б) від часу структуривання і кількості РС ( $m$ ) в ПРС-д [29]

характер поведінки не пов'язаний із зміною механізму руйнування, а зумовлений конкуренцією двох фізично різних факторів, що одночасно реалізуються в процесі паро-мікрохвильового структуривання.

Перший фактор визначається кількістю зв'язувального. Зі збільшенням у піску масової частки рідкого скла, яке було витрачене для виготовлення зразків ПРС-д, зростає товщина силікатних манжет між зернами піску, їх поперечний переріз і, відповідно, потенційна несуча здатність.

Другий фактор пов'язаний зі ступенем дегідратації цих манжет. Більш товсті (за перерізом) манжети дегідратуються в паро-мікрохвильовому середовищі повільніше, що призводить як до збереження певної кількості гідратної води у манжетах структурованої ПРС-д, так і, відповідно, підвищення їх розчинності.

У результаті, при малій тривалості ПМЗ-процесу у ПРС-д домінує кінетика дегідратації, тоді як при збільшенні часу — геометричний фактор і об'єм сформованого зв'язувального між піщинками. Тобто, інверсія відповідає зміні лімітуючої стадії процесу при переході від режиму  $k(m)\tau < 1$ , що відповідає кінетично контрольованій області неповної дегідратації, до режиму  $k(m)\tau > 1$ , в якому система переходить у структурно-контрольований стан. Перехід між цими режимами визначає інверсійний характер експериментальних залежностей.

Тобто, у проміжній області ці фактори стають співрозмірними, що і призводить до інверсії залежностей на рис. 1. Таким чином, спостережуваний ефект відображає зміну лімітуючої стадії процесу — від дегідратаційно-контрольованого режиму до структурно-геометричного.

Для узагальнення впливу зазначених факторів введено узагальнений безрозмірний параметр

структурного стану системи (ступінь реалізованості силікатних манжет):

$$\Theta_{\text{ПМЗ}} = \frac{m}{m_0} \left[ 1 - \exp(-k(m) \cdot \tau) \right], \quad (2)$$

де  $m$  — масова частка рідкого скла в суміші, %;  $m_0$  — референтне значення вмісту рідкого скла, при якому формується умовно повністю реалізована структура, %;  $k(m)$  — ефективна константа швидкості дегідратації, яка залежить від кількості рідкого скла у суміші, час<sup>-1</sup>;  $\tau$  — тривалість паро-мікрохвильового структуривання, хв.

Параметр  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  враховує як кількість рідкого скла у структурованій ПРС-д, так і ступінь його дегідратації. У даному виразі множник  $\left[ 1 - \exp(-k(m) \cdot \tau) \right]$  характеризує частку рідкого скла між частинками піску, переведеного у дегідратований, механічно ефективний стан. При цьому, слід зазначити, що параметр  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  має феноменологічний характер і вводиться як узагальнена інженерна характеристика, параметри якої визначаються за експериментальними даними для конкретної системи.

З цього випливає, що інверсійний характер залежностей (див. рис. 1) у координатах ( $m$ ,  $\tau$ ) зумовлений тим, що ці параметри незалежно впливають на ступінь структурної реалізованості. При переході до узагальненого параметра  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  залежності набувають монотонного характеру, що свідчить про коректність вибору структурного критерію.

Зростання параметра  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  призводить до формування просторово зв'язаного міжзерненого каркасу з дегідратованого рідкого скла. У першому наближенні залежність міцності структури від  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  може бути описана рівнянням насичення:

$$\sigma = \sigma_0 + A_B \cdot \left[ 1 - \exp(-b \cdot \Theta_{\text{ПМЗ}}) \right], \quad (3)$$

де  $\sigma$  — межа міцності на стиск, МПа;  $\sigma_0$  — початкова (базова) міцність при мінімальній структурній реалізованості;  $A_B$  — амплітудний коефіцієнт, що характеризує максимальний приріст міцності при повній реалізації структури;  $b$  — коефіцієнт чутливості міцності до структурної реалізованості (інтенсивність зростання міцності з  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ ).

Рівняння насиченості відображає перехід від ізольованих контактів до зв'язаного кластера манжет.

Аналогічно водостійкість суміші, виражена через відносну тривалість руйнування у воді, також є зростаючою функцією  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ :

$$\nabla = \nabla_0 + C_B \cdot \left[ 1 - \exp(-d \cdot \Theta_{\text{ПМЗ}}) \right], \quad (4)$$

де  $\nabla_0$  — базове значення водостійкості при мінімальній кількості рідкого скла у структурі;  $C_B$  — амплітудний коефіцієнт (максимальне зростання водостійкості);  $d$  — коефіцієнт чутливості водостійкості до  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ .

Таким чином, міцність, водостійкість і тривалість гідрорегенерації визначаються єдиним параметром структурного стану системи. Це обумовлено тим, що всі зазначені властивості визначаються переважно єдиним структурним фактором — ступенем зв'язаності міжзерненого силікатного каркаса.

З фізичної точки зору це означає, що при досягненні певного критичного значення  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  у системі формується просторово-безперервна мережа силікатних манжет, що інтерпретується як перехід перколяційного типу у феноменологічному сенсі, пов'язаний з досягненням критичного рівня зв'язаності структури. Саме цей перехід обумовлює різке зростання міцності і водостійкості та, відповідно, збільшення тривалості гідрорегенерації.

Узагальнено зв'язок між параметрами може бути представлений у вигляді наступної схеми:

$$\Theta_{\text{ПМЗ}} \uparrow \Rightarrow \sigma \uparrow \Rightarrow \nabla \uparrow \Rightarrow \tau_{\text{гр}} \uparrow,$$

що відображає єдину природу формування та руйнування структури.

Тобто, параметр  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  треба розглядати як інтегральну характеристику ефективної кількості силікатної зв'язки, реально переведеної в дегідратований водостійкий стан під час ПМЗ-процесу. Його вид прямо впливає з механізму ПМЗ-структурування та задовольняє фізичним граничним умовам процесу, а саме — зі збільшенням  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  зростають як міцність вихідної ПРС-д, так і водостійкість відпрацьованої ПРС-д, а отже, і тривалість гідрорегенерації.

Це свідчить про те, що зазначені властивості не є незалежними, а відображають єдиний структурний стан силікатних манжет. При малих значеннях  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  структура характеризується низькою міцністю і швидким руйнуванням у воді, що є сприятливим для гідрорегенерації. При високих  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  формується більш стійкий каркас, який чинить опір руйнуванню у воді і потребує більш тривалої обробки (гідрорегенерації).

З урахуванням цього тривалість гідрорегенерації  $\tau_{\text{гр}}$  може бути розглянута як функція параметра  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ . У першому наближенні її доцільно описувати залежністю насичення:

$$\tau_{\text{гр}} = \tau_0 + L \left[ 1 - \exp(-f\Theta_{\text{ПМЗ}}) \right], \quad (5)$$

де  $\tau_{\text{гр}}$  — тривалість гідрорегенерації, хв;  $\tau_0$  — мінімальний (базовий) час руйнування при низькій структурній реалізованості;  $L$  — амплітудний коефіцієнт (максимальне збільшення часу);  $f$  — коефіцієнт чутливості тривалості гідрорегенерації до  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  (характеризує чутливість швидкості руйнування структури до ступеня її структурної реалізованості).

Звідси впливає важливий технологічний висновок: оптимізація ПМЗ-процесу повинна здійснюватися не за максимумом міцності або водостійкості, а за мінімально достатнім значенням  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ , яке забезпечує формостійкість суміші на стадії виготовлення і вико-

ристання ливарних форм та стрижнів і, водночас, її ефективно руйнування при гідрорегенерації.

Розглядаючи процес регенерації відпрацьованих піщано-рідкоскляних сумішей, слід принципово розрізнити його за кінцевою метою. З одного боку, регенерація може бути спрямована на повторне використання суміші як формувального матеріалу для виготовлення ливарних форм і стрижнів. З іншого боку, можливе проведення гідрорегенерації з метою вилучення кварцового піску для подальшого використання як у ливарному виробництві, так і за його межами.

У випадку повторного використання суміші в ливарному цеху найбільш доцільним є її руйнування шляхом просочення водою, тобто проведення гідрорегенерації з обмеженим об'ємом води. Такий підхід забезпечує ефективно руйнування міжзернових силікатних зв'язків при мінімальному винесенні дисперсної фази та збереженні не тільки гранулометричного складу піску, але і вихідного вмісту рідкого скла.

З фізико-хімічної точки зору руйнування структури зразків з плакованого піску зумовлене проникненням води в міжзернові контакти (манжети), гідратацією та частковим або повним розчиненням силікатної фази, що, відповідно, призводить до різкого зниження або повної втрати сумішшю міцності. Водночас принципово важливим є те, що формування вторинної силікатної оболонки за таким методом гідрорегенерації відбувається не на стадії руйнування, а на наступному етапі сушіння під час її вторинної дегідратації. Тобто, після гідрорегенерації обмеженою кількістю води під час сушіння залишкова вода, що містить розчинені силікатні компоненти, випаровується. Випаровування води супроводжується концентруванням силікатного розчину, зростанням його в'язкості та переходом у геле- та склоподібний стан. У цих умовах силікат натрію осаджується на поверхні кварцових зерен, формуючи вторинну дегідратовану плівку, яка за своєю природою є плакуючим шаром. Таким чином, процес гідрорегенерації супроводжується не лише руйнуванням первинної структури, але й частковим відновленням міжзернових зв'язків за рахунок вторинного перерозподілу силікатної фази.

Гідрорегенерація обмеженою кількістю води включає такі основні технологічні операції: просочення відпрацьованої ПРС-д водою та її витримка до повного руйнування її структури; мокре залишкове подрібнення та сушіння при перемішуванні (процес плакування піску рідким склом); сухе механічне подрібнення плакованого піску; просіювання через сито з розміром комірки 0,4 мм.

Експериментально встановлено (дослідження за схемою № 2), що руйнування ПРС-д під навантаженням 0,018 МПа відбувається протягом відносно короткого часу. Це підтверджується залежністю, наведеною на рис. 2,а, відповідно до якої час руйнування зразків, просочених водою при температурі 22 °С під навантаженням, зростає зі збільшенням масового вмісту у ПРС-д рідкого скла за сигмоїдальною

залежністю.

З фізичної точки зору це означає, що зі зростанням вмісту рідкого скла збільшується товщина та

безперервність міжзернових силікатних манжет, що ускладнює проникнення води та сповільнює процес їх руйнування, що підтверджує висновки за ре-

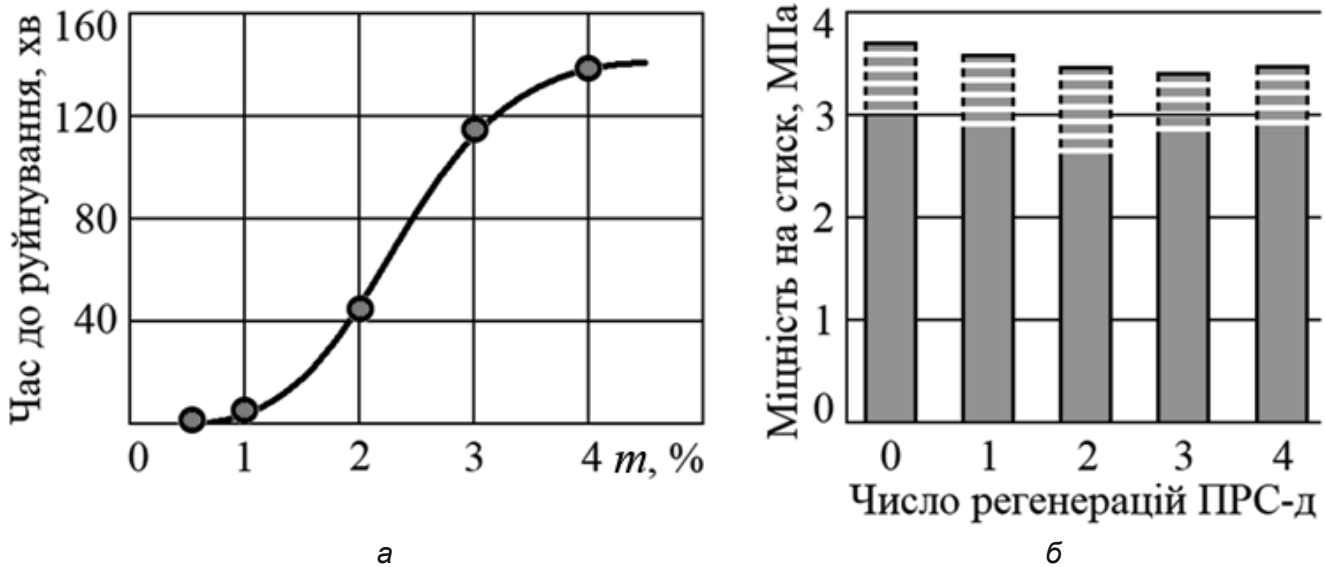


Рис. 2. Залежність часу повного руйнування зразків ПРС-д, просочених водою з температурою 22 °С, від вмісту рідкого скла в ПРС-д (а) та міцності на стиск ПРС-д від числа проведених регенерацій (б)

зультатами попереднього дослідження. При цьому співвідношення маси ПРС-д до води, якою вони були просочені у дослідженнях, складала ~ 4/1.

Результати визначення міцності на стиск зразків з ПРС-д, кварцовий пісок якої у вихідному стані був плакований 3 % рідкого скла (див. рис. 2,б) свідчать, що при раціональному виборі і проведенні режимів такої гідрорегенерації можливе практично повне відновлення структуроутворюючої здатності суміші без додаткового або обмеженої кількості використання рідкого скла або свіжого піску, що відкриває перспективи створення ресурсозберігаючих технологій у ливарному виробництві.

Результати досліджень залежності міцності на стиск зразків ПРС-д від часу витримки у воді при її різних вихідній температурі (22, 62 і 99 °С), об'ємах води та вмісті рідкого скла (2...4 %мас.) свідчать про закономірний і системний характер руйнування структури зв'язувального під впливом водного середовища, про що свідчить аналіз даних табл. 1 та залежностей на рис. 3.

З аналізу даних табл. 1 та залежностей на рис. 3 випливає, що у всіх розглянутих випадках спостерігається монотонне зниження міцності вторинно-структурованих ПРС-д зі збільшенням часу витримки у воді вихідних зразків, що вказує на домінування процесів розміцнення, пов'язаних із взаємодією рідкоскляного зв'язувального з водою. При цьому швидкість зниження міцності істотно залежить як від температури води, так і від співвідношення маси зразка (піску) і води, а також від вмісту рідкого скла в суміші у вихідній ПРС-д.

З фізико-хімічної точки зору руйнування структури обумовлено сукупністю процесів гідролізу та розчинення лужного силікату натрію. При контакті з водою відбувається розрив силікатних зв'язків і перехід ча-

стини зв'язувального у розчин, що призводить до зниження числа міжзернових контактів і втрати несучої здатності структури. Зазначені процеси мають дифузійно-кінетичний характер і найбільшою мірою залежать від умов масопереносу та температури води. Зокрема, підвищення початкової температури води призводить до різкого прискорення руйнування структури. При переході від 22 °С до 99 °С час повного руйнування зразків зменшується в кілька разів.

Зростання температури призводить до збільшення рухливості молекул води, прискорення дифузії у поровому просторі та інтенсифікації руйнування силікатної структури.

Істотно впливає і відношення маси зразка до маси води. При збільшенні обсягу води, що використовується при гідрорегенерації, спостерігається значне прискорення втрати міцності структурованих сумішей вразі. Це пов'язано з тим, що при більшому об'ємі води знижується концентрація розчинених у ній силікатів, що усуває ефект насичення розчину та підтримує високий градієнт концентрацій на межі «тверде-рідина». У результаті посилюється дифузійний потік речовини з ПРС-д у розчин, а процес руйнування набуває більш вираженого характеру. Таким чином обсяг води фактично визначає граничні умови масообміну та впливає на ефективну швидкість вимивання зв'язувального з ПРС-д.

Вплив вмісту рідкого скла проявляється у збільшенні вихідної міцності як первинно- ПРС-д, так і вторинно-структурованих сумішей, та у зміні кінетики її зниження для вторинно-структурованих ПРС-д. При збільшенні вмісту зв'язувального від 2 % до 4 % спостерігається зростання початкової міцності зразків, що зумовлено збільшенням кількості силікатної фази та числа міжзернових контактів. Одночасно збільшується і час їх повного руйнування,

Межа міцності на стиск вторинно-структурованої ПРС-д за ПМЗ-процесом після її витримки у воді за скороченим часом гідрорегенерації

Початкова температура води 99 °С, масовий вміст рідкого скла у ПРС — 2 %							
Співвідношення пісок/вода (за масою) під час гідрорегенерації	Межа міцності на стиск вторинно-структурованої ПРС після її витримки у воді під час гідрорегенерації, МПа						
	0 хв	6 хв	12 хв	24 хв	30 хв	60 хв	90 хв
2	2,34		2,2		1,8	1,04	0,34
1	2,34		2,1		1,4		
0,67	2,34		1,8	1,17	0,87		
0,5	2,34	1,9	1,57				
Початкова температура води 99 °С, масовий вміст рідкого скла у ПРС — 3 %							
Співвідношення пісок/вода (за масою) під час гідрорегенерації	Межа міцності на стиск вторинно-структурованої ПРС після її витримки у воді під час гідрорегенерації, МПа						
	0 хв	15 хв	30 хв	60 хв	90 хв	120 хв	
2	3,24		3	2,4	1,7	0,9	
1	3,24		2,6	1,5			
0,67	3,24		1,9	0,61			
0,5	3,24	2,44	1,68				
Початкова температура води 99 °С, масовий вміст рідкого скла у ПРС — 4 %							
Співвідношення пісок/вода (за масою) під час гідрорегенерації	Межа міцності на стиск вторинно-структурованої ПРС після її витримки у воді під час гідрорегенерації, МПа						
	0 хв	30 хв	60 хв	90 хв	120 хв	150 хв	180 хв
2	4,02	3,7	3,3	2,8	2,2	1,41	0,8
1	4,02	3,4	2,6	1,5	0,42		
0,67	4,02	3	1,8	0,42			
0,5	4,02	2,6	1,08				
Початкова температура води 62 °С, масовий вміст рідкого скла у ПРС — 2 %							
Співвідношення пісок/вода (за масою) під час гідрорегенерації	Межа міцності на стиск вторинно-структурованої ПРС після її витримки у воді під час гідрорегенерації, МПа						
	0 хв	12 хв	30 хв	60 хв	90 хв	120 хв	
2	2,34		1,9	1,4	0,69	0,07	
1	2,34		1,55	0,55	0,00		
0,67	2,34		1,3	0,00			
0,5	2,34	1,68	0,83				
Початкова температура води 62 °С, масовий вміст рідкого скла у ПРС — 3 %							
Співвідношення пісок/вода (за масою) під час гідрорегенерації	Межа міцності на стиск вторинно-структурованої ПРС після її витримки у воді під час гідрорегенерації, МПа						
	0 хв	30 хв	60 хв	90 хв	120 хв	150 хв	
2	3,24	2,8	2,2	1,82	1,25		
1	3,24	2,6	1,8	0,75			
0,67	3,24	2,3	1,2				
0,5	3,24	1,8	0,51				
Початкова температура води 62 °С, масовий вміст рідкого скла у ПРС — 4 %							
Співвідношення пісок/вода (за масою) під час гідрорегенерації	Межа міцності на стиск вторинно-структурованої ПРС після її витримки у воді під час гідрорегенерації, МПа						
	0 хв	30 хв	60 хв	90 хв	120 хв	150 хв	180 хв
2	4,02	3,8	3,3	2,9	2,3	1,7	1,35
1	4,02	3,5	2,9	1,93	1,05	0,17	
0,67	4,02	3,2	2,4	1,02			
0,5	4,02	2,95	1,75	0,22			

Продовження таблиці 1

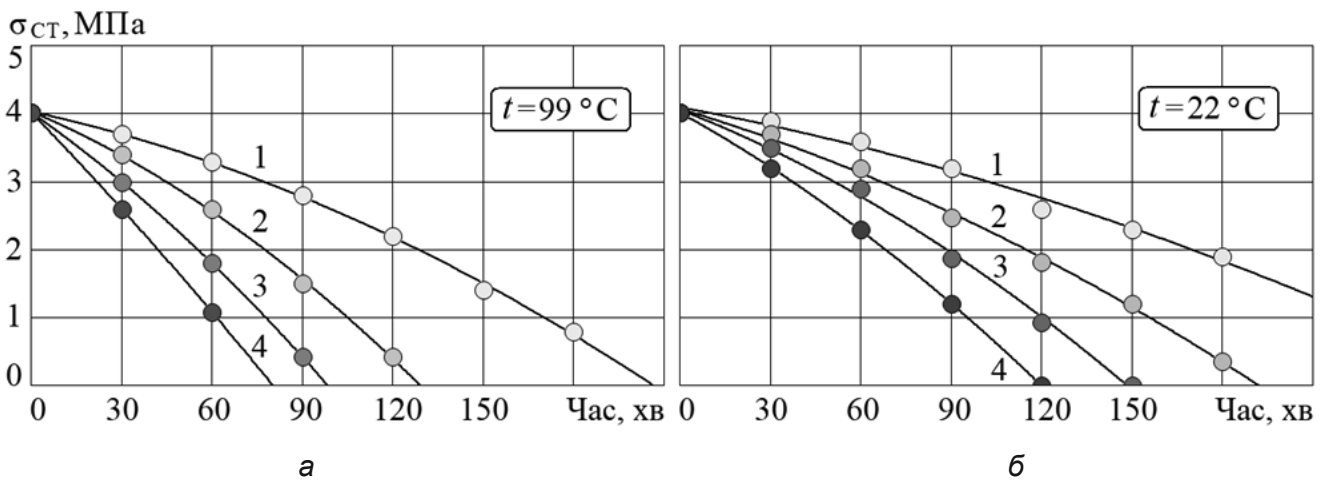
Початкова температура води 22 °С, масовий вміст рідкого скла у ПРС — 2 %							
Співвідношення пісок/вода (за масою) під час гідрорегенерації	Межа міцності на стиск вторинно-структурованої ПРС після її витримки у воді під час гідрорегенерації, МПа						
	0 хв	45 хв	75 хв	105 хв	135 хв	150 хв	
2	2,34	1,81	1,31	0,85	0,35	0,09	
1	2,34	1,32	1,2	0			
0,67	2,34	1,0	0				
0,5	2,34	0					

Початкова температура води 22 °С, масовий вміст рідкого скла у ПРС — 3 %							
Співвідношення пісок/вода (за масою) під час гідрорегенерації	Межа міцності на стиск вторинно-структурованої ПРС після її витримки у воді під час гідрорегенерації, МПа						
	0 хв	30 хв	60 хв	90 хв	120 хв	150 хв	180 хв
2	3,24	3	2,7	2,1	1,68	1,2	0,82
1	3,24	2,8	2,2	1,5	0,65		
0,67	3,24	2,6	1,63	0,67			
0,5	3,24	2,1	1,1	0			

Початкова температура води 22 °С, масовий вміст рідкого скла у ПРС — 4 %								
Співвідношення пісок/вода (за масою) під час гідрорегенерації	Межа міцності на стиск вторинно-структурованої ПРС після її витримки у воді під час гідрорегенерації, МПа							
	0 хв	30 хв	60 хв	90 хв	120 хв	150 хв	180 хв	210 хв
2	4,02	3,9	3,6	3,2	2,6	2,3	1,9	0
1	4,02	3,7	3,2	2,47	1,82	1,2	0,35	
0,67	4,02	3,5	2,9	1,88	0,93	0		
0,5	4,02	3,2	2,3	1,2	0			



**Рис. 3.** Залежність міцності на стиск зразків з ПРС-д (вихідний вміст рідкого скла — 4 %, за масою поверх 100 % піску), які були вторинно структуровані за ПМЗ-процесом від часу витримки вихідних зразків у воді з вихідною температурою 99 °С (а) та 22 °С (б) при масовому співвідношенні піску до води під час гідрорегенерації: 1 — 2; 2 — 1; 3 — 0,67; 4 — 0,5

що вказує на зростання ресурсу «зв'язувального», що підлягає розчиненню. Однак характер зниження міцності зразків із вдруге структурованих ПРС-д при цьому зберігається, що свідчить про збереження механізму руйнування, а не про його зміну.

Криві зниження міцності мають характер, близький до нелінійного, з поступовим прискоренням руйнування завершальної стадії. Це вказує на те, що процес руйнування не є строго лінійним за часом і, ймовірно, включає стадію накопичення пошкоджень структури з подальшим лавиноподібним руйнуванням.

Отримані дані свідчать про те, що водостійкість

таких систем є не тільки функцією складу, а й суттєво залежить від зовнішніх умов експлуатації, що необхідно враховувати при розробці складів ливарних форм, виборі технологічних режимів їх використання, а також умов та технології регенерації відпрацьованої ПРС-д.

Результати дослідження впливу масового вмісту рідкого скла у ПРС-д, температури води, в якій витримували зразки, масу 20 % розчину сірчаноокислого алюмінію у воді, необхідну для нейтралізації відпрацьованої води до pH ≈ 7 (дослідження за схемою № 4), представлені в табл. 2.

За результатами експериментальних даних

табл. 2 побудовано наступне рівняння:

$$E = 3,76 + 7,28 \cdot C \cdot (1 - \exp[-(0,01436 \cdot A + 0,001361 \cdot D)]), \quad (6)$$

де 3,76 — фоновий вклад;  $7,28 \cdot C$  — потенціал розчинного рідкого скла масою  $C$ ;  $0,01436 \cdot A$  — вплив температури води на час розчинення дегідратованого рідкого скла в ПРС-д масою  $B$ ;  $0,001361 \cdot D$  — вплив об'єму води, що використовується для гідрорегенерації ПРС-д масою  $C$ .

За результатами зіставлення розрахункових та експериментальних значень встановлено, що запропонована модель, яка експоненційно-насичується, задовільно описує зміну витрати 20 %-го сірчаноокислого алюмінію залежно від температури води, вмісту рідкого скла і маси во-

ди, що використовується при гідрорегенерації. Експоненційно-насичуваний вигляд рівняння відображає обмеження процесу масопереносу та поступове досягнення рівноважної концентрації розчинених силікатів.

Максимальна помилка розрахунку величини  $E$  за моделлю (6) не перевищує 10 %, що дозволяє рекомендувати рівняння (6) для проведення інженерних та технологічних розрахунків. При цьому слід зазначити, що найбільші відхилення між експериментальними та розрахунковими даними спостерігаються в області проміжних режимів, де, ймовірно, починає позначатися вплив додаткових факторів, не врахованих у моделі в явному вигляді.

Дані табл. 2 і отримана модель (6) відображають кількісні закономірності переходу лужних компонентів

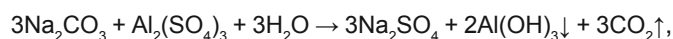
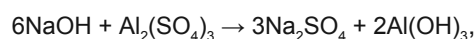
Таблиця 2

Температура води, в якій витримували зразки (А), маса піску у зразку ПРС-д (В), масовий вміст рідкого скла у ПРС-д (С), який був використаний для структурування суміші, маса води, в якій руйнували зразки (D), маса 20 % розчину сірчаноокислого алюмінію у воді, необхідна для нейтралізації відпрацьованої води (E)

A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
22	100	2	50	8,3	62	100	3	100	18,5
22	100	2	100	9,7	62	100	3	150	19,5
22	100	2	150	10,1	62	100	4	50	21,5
22	100	2	200	10,3	62	100	4	100	23,6
22	100	3	50	11	62	100	4	150	25,1
22	100	3	100	11,8	62	100	4	200	25,4
22	100	3	150	12	99	100	2	50	13,5
22	100	3	200	12,5	99	100	2	100	15,8
22	100	4	50	13,6	99	100	2	150	16,7
22	100	4	100	14,4	99	100	3	50	19
22	100	4	150	14,8	99	100	3	100	21
22	100	4	200	15	99	100	3	150	22,2
62	100	2	50	11,5	99	100	4	50	24,1
62	100	2	100	13	99	100	4	100	25,7
62	100	2	200	14,9	99	100	4	150	27
62	100	3	50	16,3	99	100	4	200	28,2

зв'язувального у відпрацьованих ПРС-д у розчин і дозволяють побічно оцінити ступінь його руйнування. З аналізу даних табл. 2 випливає, що маса нейтралізуючого реагенту  $m_{\text{СКА}}$  зростає як зі збільшенням вмісту рідкого скла в суміші, так і з підвищенням температури води. Це свідчить про те, що кількість лужних компонентів, що вимиваються в розчин, прямо пропорційно вихідному вмісту зв'язувального й істотно залежить від термодинамічних і кінетичних умов взаємодії системи з водою.

З хімічної точки зору, вимірювана величина  $E$  пропорційна кількості лугу, накопиченого в розчині, насамперед гідроксидів та карбонатів натрію, що утворюються в результаті гідролізу та карбонізації рідкого скла. Процес нейтралізації в цьому випадку може бути представлений такими рівняннями:



що дозволяє розглядати величину  $E$  як інтегральну характеристику ступеня вимивання та руйнування силікатного зв'язувального.

Таким чином, аналіз отриманої залежності показує, що витрата розчину, що нейтралізує, після гідрорегенерації відпрацьованої ПРС-д зростає зі збільшенням температури води, вмісту рідкого скла в суміші і маси води, що використовується при гідрорегенерації. Найбільш сильний вплив має вміст рідкого скла, оскільки саме воно визначає загальний обсяг силікатних продуктів, що переходять у водну фазу при гідрорегенерації. Підвищення температури води інтенсифікує руйнування силікатної

оболонки на зернах піску і підвищує повноту видалення зв'язувального, тоді як збільшення кількості води має позитивну, але має загасаючу дію. Це свідчить про те, що для ливарних цехів найбільш раціональні режими гідрорегенерації засновані не на простому збільшенні витрати води, а на поєднанні підігріву води з оптимальною кількістю, достатньою для винесення продуктів руйнування рідкого скла при мінімізації витрат на подальшу хімічну обробку стічних вод.

Слід зазначити, що на тривалість гідрорегенерації ПРС-д впливають і зовнішні фактори, серед яких погодні умови, за яких відбувалось зберігання ПРС-д. У цій роботі досліджували вплив температури та відносної вологості повітря, на якому зберігали зразки ПРС-д протягом 30 діб (дослідження за схемою № 5) на час повного руйнування структурованих зразків ПРС-д у воді.

Залежність часу повного руйнування структурованих зразків ПРС-д у воді з температурою 22 °С від часу їх попередньої витримки на повітрі взимку (1) та влітку (2) у м. Одеса представлені на рис. 4.

Отримані експериментальні залежності часу руйнування у воді з температурою 22 °С, структурованої за ПМЗ-процесом ПРС-д з 3 % рідкого скла після їх попередньої витримки на повітрі взимку та влітку на узбережжі м. Одеса, свідчать про немонотонний характер зміни водостійкості зв'язувального та принципово різної кінетики структурних перетворень залежно від температурно-вологісних умов.

Встановлено, що для літніх умов зберігання структурованих ПРС-д характерна наявність вираженого мінімуму часу руйнування при проміжній тривалості атмосферної витримки (~20 діб), тоді як зі збільшенням часу вилежування до 30 діб спостерігається повторне зростання водостійкості. У зимових умовах навпаки, в інтервалі до 20 діб зміна часу руйнування практично відсутня, проте при подальшому збільшенні часу витримки структурована ПРС-д повністю втрачає здатність до руйнування у воді.

Очевидно, що такий характер залежностей вказує на реалізацію в системі щонайменше двох конкуруючих фізико-хімічних процесів, що протікають у висохлому рідкоскляному зв'язувальному при його контакті з атмосферним середовищем. Перший з них пов'язаний з розміцненням структури та обумовлений карбонізацією лужного силікату натрію з утворенням силікагелю та водорозчинних лужних карбонатів, а також із супутнім збільшенням дефектності та локального розпушення зв'язувального. Другий процес має протилежну спрямованість і пов'язаний з поліконденсацією кремнезему, дегідратацією силікагелю та формуванням більш щільного просторового силікатного каркаса, що має підвищену водостійкість.

З урахуванням цього зміна часу руйнування при атмосферній витримці тривалістю  $t$  може бути представлено в рамках феноменологічної кінетичної моделі двох конкуруючих процесів у вигляді:

Час до руйнування, хв

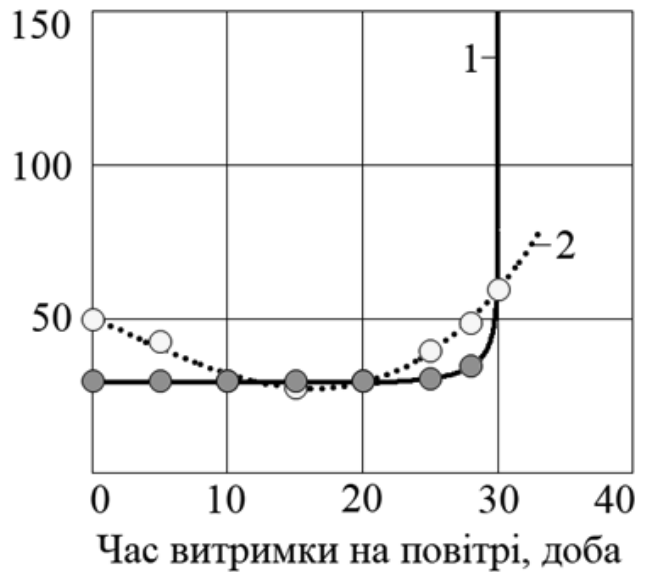


Рис. 4. Залежність часу повного руйнування структурованих зразків ПРС-д у воді від часу їх попередньої витримки на повітрі взимку (1) та влітку (2) у м. Одеса

$$\tau(t) = \tau_0 - A_d \left(1 - e^{-k_d t}\right) + A_s \left(1 - e^{-k_s t}\right), \quad (7)$$

де  $\tau_0$  — час руйнування ПРС-д до початку витримки на відкритому повітрі,  $A_d$  і  $k_d$  — відповідно, гранична величина та швидкість розміцнюючого процесу, а  $A_s$  і  $k_s$  — аналогічні параметри для процесу структурного зміцнення.

Величина  $\tau(t)$  у виразі (7) виступає інтегральною характеристикою водостійкості і відбиває баланс між накопиченням водорозчинних продуктів і ступенем формування водостійкого силікатного каркаса.

Наявність мінімуму на літній залежності обумовлена тим, що на початковій стадії атмосферної витримки виконується нерівність  $A_d k_d > A_s k_s$ , тобто швидкість та внесок розміцнюючих процесів перевищують внесок процесів зміцнення. Це призводить до зменшення часу руйнування за рахунок інтенсивного виникнення у висушеному рідкому склі розчинних карбонатів і часткової руйнації його первинної структури. У міру збільшення часу витримки розміцнюючий процес виходить на насичення, тоді як поліконденсація кремнезему продовжується, внаслідок чого починає домінувати зміцнення структури, що супроводжується зростанням водостійкості та збільшенням  $\tau$ .

У зимових умовах спостерігається якісно інша кінетика, що пов'язано з істотним уповільненням як карбонізації, так і процесів поліконденсації при зниженій температурі і змінній вологості повітря. Це призводить до появи індукційного періоду, протягом якого ефективно структурне зміцнення мало реалізується. Для опису такої поведінки модель має бути доповнена індукційним часом  $t_i$ , після якого починається помітний розвиток зміцнюючого процесу:

$$\tau(t) = \tau_0 - A_d \left(1 - e^{-k_d t}\right) + H(t - t_i) A_s \left(1 - e^{-k_s(t - t_i)}\right), \quad (8)$$

де  $H(t - t_i)$  — функція Хевісайду.

При цьому слід зазначити, що запропонована модель має якісний характер і використовується лише для інтерпретації отриманих експериментальних даних.

В інтервалі  $t \leq t_i$  структура зв'язувального залишається близькою до вихідної, що пояснює практично постійний час руйнування при витримці ПРС-д на відкритому зимовому повітрі до 20 діб. Після досягнення критичного ступеня структурної перебудови ( $t > t_i$ ) відбувається інтенсивне формування просторово-безперервного силікатного каркаса, що призводить до різкого практично абсолютного збільшення водостійкості.

Додатковим фактором, що сприяє стрибкоподібному зростанню в зимових умовах, може бути досягнення порогового рівня зв'язності структури, аналогічного перколяційному типу переходу. При досягненні критичної частки сформованого кремнеземного каркаса відбувається виникнення його безперервної просторової мережі, що визначає опір розмиву не лише на рівні локальних контактів, але в рівні обсягу зразка ПРС-д загалом. Це якісно змінює механізм руйнування при взаємодії з водою та призводить до багаторазового збільшення часу руйнування.

Таким чином встановлено, що атмосферна витримка ПРС-д не призводить до монотонної зміни їхньої водостійкості, а супроводжується реалізацією конкуруючих процесів розміцнення та структурного зміцнення, співвідношення швидкостей яких визначається температурно-вологісними умовами довкілля. Літні умови сприяють швидкому перебігу обох процесів та формуванню немонотонної залежності з мінімумом, тоді як зимові умови призводять до появи індукційного періоду та подальшої втрати здатності до руйнування у воді внаслідок формування більш досконалого та просторово зв'язкового силікатного каркаса.

Як було зазначено вище, використання відпрацьованих ПРС-д можливо і в якості шихтового матеріалу для варки силікат-брили. Справа в тому, що основні вимоги до кварцового піску для виробництва силікат-брили орієнтовані на стандарти для скляної сировини та галузеві технічні умови виробництва силікат-брили і включають:

— хімічний склад (за масою):  $\text{SiO}_2$  — не менше 96...99 %  $\text{SiO}_2$  оксидів заліза ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  $\leq 0,1...0,3$  %, глини та пілоподібних частинок  $\leq 1\%$ , органічні домішки, карбонати, реакційно-активні включення — не допускаються;

— вологість — менше 1...2 %;

— хімічна однорідність — стабільний склад партії, мінімальні відхилення за вмістом  $\text{SiO}_2$  та домішками;

— гранулометричний склад — фракцію кварцового піску та відпрацьованої ПРС-д після помелу підбирають, виходячи з типу використовуваних печей для варки силікат-брили.

Як такий, вибір гранулометричного складу кварцового піску визначається умовами тепломасообміну в печі. Для варіння силікат-брили встановлено, що дрібні фракції (0,05...0,4 мм) забезпечують підвищену реакційну здатність і швидке плавлення шихти, що є характерним для печей обертового типу [30]. Водночас використання більш крупних фракцій (до 1...2 мм) забезпечує високу газопроникність і стабільне проходження газів у шахтних печах, що сприяє рівномірному прогріванню шихти та попереджає її злиття [30].

Аналіз даних про вимоги до шихти для плавки силікат-брили показує, що після помелу та відсіву великих фракцій відпрацьована ПРС-д у цілому відповідає вимогам до шихтових матеріалів для варіння силікат-брили. При цьому при зміні хімічного складу або кількості ПРС-д у складі шихти доцільно проводити розрахунок усіх шихтових матеріалів з точки зору не тільки відповідності силікат-брили за хімічним складом та силікатним модулем, але і за часом та енерговитратами на проведення плавки.

В якості прикладу спрощеного покрового розрахунку шихти з ПРС-д для виробництва силікат-брили з силікатним модулем  $M_{\text{SiO}_2} = 2,8$  приймемо наступний склад відпрацьованої ПРС-д (за масою):  $\text{SiO}_2 = 92$  %, залишки зневодненого рідкого скла  $\text{Na}_2\text{O} = 2,5$  %, інші домішки ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і т.д.) = 5,5 %; масовий вміст домішок у свіжому піску дорівнює 2 %. Для варіння, крім свіжого кварцового піску та відходів ПРС-д, використовуємо соду.

#### Послідовність розрахунку:

**Крок 1.** Задамо базу розрахунку — маса у шихті чистого  $\text{SiO}_2$  — 1000 кг.

**Крок 2.** Приймемо такі масові частки  $\text{SiO}_2$ :

— 30 %  $\text{SiO}_2$  із відходів ПРС-д;

— 70 %  $\text{SiO}_2$  із свіжого кварцового піску.

Тобто, якщо необхідно забезпечити в силікат-брилі 300 кг  $\text{SiO}_2$  з відходу ПРС-д, то з урахуванням вмісту в ньому 2,5 %  $\text{Na}_2\text{O}$  та 5,5 % домішок для плавки необхідно взяти відходів ПРС-д такою масою:

$$m_{\text{ПРС-д}} = 300 \cdot (1 + 0,01 \cdot (2,5 \% + 5,5 \%)) = 324 \text{ кг.}$$

У той же час, для отримання 700 кг  $\text{SiO}_2$  від свіжого кварцового піску з урахуванням вмісту в ньому 2 % домішок необхідно взяти свіжий кварцовий пісок такою масою:

$$m_{\text{пісок}} = 700 \cdot (1 + 0,01 \cdot 2 \%) = 714 \text{ кг.}$$

**Крок 3.** Розрахуємо внесок  $\text{Na}_2\text{O}$  у силікат-брилу з відходу ПРС-д.

Оскільки у відході ПРС-д вміст  $\text{Na}_2\text{O} = 2,5$  %, то в силікат-брилу з відходів ПРС-д потрапить окису натрію:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ПРС-д}} = m_{\text{ПРС-д}} \cdot 2,5 \% / 100 = 324 \cdot 2,5 \% / 100 = 8,1 \text{ кг.}$$

**Крок 4.** Розраховуємо необхідну масу  $\text{Na}_2\text{O}$  у готовій силікат-брилі для її отримання з величиною

силікатного модуля  $M_{\text{SiO}_2} = 2,8$ :

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{Г}} = \text{SiO}_2 / M_{\text{SiO}_2} = 1000 / 2,8 = 357 \text{ кг.}$$

**Крок 5.** Розраховуємо масу  $\text{Na}_2\text{O}$ , що надходить у силікат-брилу із соди:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{сода}} = \text{Na}_2\text{O}_{\text{Г}} - \text{Na}_2\text{O}_{\text{ПРС-д}} = 357 - 8,1 = 348,9 \text{ кг.}$$

**Крок 6.** Використовуючи коефіцієнт  $N = 0,585$  ( $N$  — масовий вміст  $\text{Na}_2\text{O}$  у соді) та величину  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{сода}}$ , розраховуємо необхідну для варки кількість соди ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ):

$$m_{\text{сода}} = \text{Na}_2\text{O}_{\text{сода}} / N = 348,9 / 0,585 \approx 596,4 \text{ кг.}$$

**Крок 7.** Складаємо заключний склад шихти для виробництва силікат-брили з силікатним модулем 2,8 для прийнятих у розрахунку шихтових матеріалів.

- Відходи ПРС-д — 326 кг;
- Свіжий кварцовий пісок — 714 кг;
- Сода — 596,4 кг.

**Крок 8.** Використання шихти такого складу дозволить виготовити силікат-брилу з силікатним модулем 2,8 у кількості:

$$m_{\text{ПРС-д}} + m_{\text{пісок}} + \text{Na}_2\text{O}_{\text{сода}} = 324 + 714 + 348,9 = 1386,9 \text{ кг.}$$

*Розрахунок завершено.*

З аналізу результатів розрахунку випливає, що використання відходів ПРС-д з прийнятим для розрахунку хімічним складом дозволяє зменшити витрату соди з  $\approx 610$  кг до  $\approx 596$  кг. Тобто головний економіко-екологічний ефект від використання відходів ПРС-д у виробництві силікат-брили — це використання відпрацьованої ПРС-д, у першу чергу, для заміни частини свіжого кварцового піску, а не соди.

При цьому слід зазначити, що якщо рідкого скла

у відході більше (наприклад 5 %), то економія соди різко зростає, але зростає і ризик перелужування силікат-брили, що погіршує її подальшу розчинність у процесі виробництва рідкого скла.

Для порівняльної оцінки впливу зміни складу шихти для варіння силікат-брили з різним силікатним модулем від вмісту в шихті відпрацьованої ПРС-д, структурованої за ПМЗ-процесом, провели розрахунок за наведеною вище методикою. При цьому забруднення в ПРС-д у розрахунок не враховували, оскільки сумарний вміст цих домішок, як правило, менше 0,5 %, що суттєво не впливає на варіння, якість силікат-брили і, відповідно, не потребує коригування шихти. Результати розрахунку наведено у табл. 3.

Енерговитрати при варінні силікат-брили залежать від температури переходу шихти в рідкий стан (чим вище силікатний модуль силікат-брили, тим вища витрата енергії), частки ПРС-д у шихті, її вологості та фракційного складу.

Практика варіння силікат-брили з відходами ПРС-д (вміст 0,2...1,0 %  $\text{Na}_2\text{O}$  у ПРС-д, за масою) у печі шахтного типу свідчить, що з точки зору скорочення витрати енергоносіїв та часу варіння масовий вміст у шихті відходів ПРС-д має бути 5...50 % (за масою). При частці відходів у шихті понад 70...75 % процес варіння ускладнюється: спостерігається неоднорідність температури у ванні печі, формуються локальні плавні, підвищується прилипання шихти до стінок печі.

З викладеного вище випливає, що використання відпрацьованих ПРС-д для виробництва силікат-брили технологічно можливе, хімічно виправдане і може бути рекомендоване як часткова заміна сировини. Однак використання відпрацьованих ПРС-д вимагає контролю їх складу та, за потреби, відповідного перерахунку величини силікатного модуля. При правильному коригуванні шихти використання відпрацьованих ПРС-д не тільки знижує витрату соди та свіжого піску, а й дозволяє практич-

Таблиця 3

Зведена таблиця шихти (кг) для силікат-брили при використанні в шихті відпрацьованої ПРС-д, що містить 98,5 %  $\text{SiO}_2$ , 1 %  $\text{Na}_2\text{O}$  і 0,5 % домішок

Вміст ПРС-д у шихті, %	ПРС-д (кг)	Пісок (кг)	Сода (кг)	ПРС-д (кг)	Пісок (кг)	Сода (кг)	ПРС-д (кг)	Пісок (кг)	Сода (кг)
	Модуль силікат-брили $M_{\text{SiO}_2} = 2,8$			Модуль силікат-брили $M_{\text{SiO}_2} = 2,9$			Модуль силікат-брили $M_{\text{SiO}_2} = 3,0$		
10	102	918	608	102	918	586	102	918	566
20	203	816	606	203	816	584	203	816	564
30	305	714	604	305	714	582	305	714	562
40	406	612	602	406	612	580	406	612	560
50	508	510	600	508	510	578	508	510	558
60	609	408	598	609	408	576	609	408	556
70	711	306	596	711	306	574	711	306	554
80	812	204	594	812	204	572	812	204	552
90	914	102	592	914	102	570	914	102	550
100	1016	0	590	1016	0	568	1016	0	548

но повністю уникнути утилізації відходів, що дає як економічний, так і екологічний ефект.

Практичне використання/врахування отриманих результатів дозволяє:

— підвищити ступінь регенерації піску за рахунок повнішого видалення рідкоскляного зв'язувального;

— зменшити витрати свіжого піску та зв'язувальних матеріалів;

— оптимізувати витрати води та енергетичні витрати на підігрів;

— підвищити стабільність властивостей регенованих формувальних сумішей;

— знизити екологічне навантаження за рахунок скорочення відходів ливарного виробництва.

**Обговорення результатів.** Таким чином, у роботі встановлено, що структура та властивості ПРС-д визначаються ступенем реалізації міжзеренного силікатного каркаса, який узагальнено описується параметром  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ . Показано, що міцність, водостійкість і тривалість гідрорегенерації підпорядковуються єдиній закономірності експоненційного насичення. Встановлено інверсійний характер залежностей, зумовлений конкуренцією процесів формування та дегідратації зв'язувального. Розроблено модель, що описує перехід лужних компонентів у розчин. Показано можливість ефективної гідрорегенерації та повторного використання суміші.

Отримані залежності мають узагальнений характер у межах досліджуваного інтервалу складів і режимів, але вони можуть бути використані або враховані як науково обґрунтовані базові матеріали для створення ефективних технологій гідрорегенерації пісків та ПРС-д для їх подальшого використання як у виробництві ливарних форм і стрижнів на основі ПРС-д, так і для інших технологічних процесів.

## Висновки

За результатами виконаних досліджень:

1. Встановлено, що водостійкість структурованих дегідратацією піщано-рідкоскляних сумішей (ПРС-д), визначена через відносну тривалість руйнування у воді, є коректною нормованою характеристикою, яка дозволяє зіставляти різні склади та режими структурування незалежно від абсолютних значень часу руйнування.

2. Показано, що залежності водостійкості ПРС-д від вмісту в них рідкого скла та тривалості ПМЗ-структурування мають інверсійний характер, що обумовлено конкуренцією двох факторів:

— збільшенням кількості та геометричної форми силікатних манжет (зміцнюючий фактор);

— ступенем їх дегідратації (розчинність та схильність до руйнування).

При цьому інверсія водостійкості у ПРС-д відображає зміну лімітуючої стадії процесу — від кінетики дегідратації до структурно-геометричного контролю.

3. Запропоновано узагальнений безрозмірний параметр  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ , який інтегрально враховує як кількість

рідкого скла у ПРС-д, так і ступінь його переходу в дегідратований стан. Доведено, що саме цей параметр є визначальним для опису структурного стану досліджуваної системи та її властивостей.

4. Встановлено, що міцність, водостійкість та тривалість гідрорегенерації ПРС-д описуються одноподібними експоненційно-насичуваними залежностями від  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ , що свідчить про їх єдину фізико-хімічну природу та обумовленість ступенем реалізації міжзеренного силікатного каркаса.

5. Показано, що при досягненні критичного значення  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$  у системі формується просторово-безперервна мережа силікатних манжет, що супроводжується різким зростанням міцності та водостійкості ПРС-д.

6. Встановлено закономірне монотонне зниження міцності вторинно-структурованих сумішей при їх витримці у воді, що обумовлено процесами гідролізу та розчинення силікатного зв'язувального. Процес має дифузійно-кінетичний характер й істотно залежить від температури та умов масопереносу.

7. Доведено, що підвищення температури води та збільшення її об'єму інтенсифікують руйнування структури ПРС-д за рахунок прискорення дифузії та підтримання градієнта концентрацій, тоді як збільшення вмісту рідкого скла у складі ПРС-д підвищує як їх початкову міцність, так і тривалість руйнування.

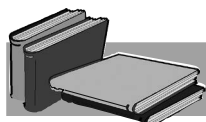
8. Отримано емпіричну залежність для визначення витрати нейтралізуючого реагенту, яка адекватно (з похибкою до 10 %) описує процес переходу лужних компонентів у водну фазу та може бути використана для інженерних розрахунків та моделювання.

9. Встановлено, що атмосферна витримка ПРС-д супроводжується реалізацією двох конкуруючих процесів — розміцнення (карбонізація, утворення розчинних продуктів) та зміцнення (поліконденсація, дегідратація), що визначає немонотонний характер зміни водостійкості та залежить від температурно-вологісних умов їх зберігання до початку проведення гідрорегенерації.

10. Показано, що гідрорегенерація з обмеженим об'ємом води (просочення ПРС-д водою) супроводжується не лише руйнуванням первинної структури, але й формуванням вторинної силікатної оболонки при подальшому сушінні, що відкриває можливість багаторазового умовно безвідходного використання суміші для виготовлення ливарних форм та стрижнів.

11. Доведено технологічну доцільність використання відпрацьованих ПРС-д як шихтового матеріалу для виробництва силікат-брили, що забезпечує зниження витрат свіжого піску та частково соди, а також сприяє ресурсозбереженню та зменшенню відходів відпрацьованих ПРС-д.

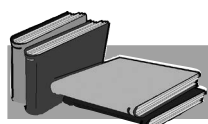
12. Сформульовано ключовий технологічний принцип: оптимізація ПМЗ-процесу повинна здійснюватися не за максимальними значеннями міцності або водостійкості, а за мінімально достатнім значенням параметра  $\Theta_{\text{ПМЗ}}$ , що забезпечує баланс між експлуатаційною стійкістю форм при виготовленні виливків та ефективністю їх подальшої регенерації.



## ЛІТЕРАТУРА

1. Sgarlata C., Ariza-Tarazona M.C., Paradisi E., Siligardi C., Lancellotti I. Use of Foundry Sands in the Production of Ceramic and Geopolymers for Sustainable Construction Materials. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 8. Article 5166. <https://doi.org/10.3390/app13085166>
2. Gedik A., Lav A.H., Lav M.A. Investigation of alternative ways for recycling waste foundry sand: an extensive review to present benefits. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2018. Vol. 45. No. 6. P. 423—434. <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0183>
3. Mhaya A.M., Shahidan S., Goel A., Huseien G.F. Effect of metakaolin content and shape design on strength performance of lightweight rubberized geopolymer mortars incorporated slag-waste glass powders. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 432. Article 136500. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136500>
4. Boukherroub T., D'amours S., Rönqvist M. Sustainable forest management using decision theaters: rethinking participatory planning. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 179. P. 567—580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.084>
5. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 127. P. 221—232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
6. Domingues L.G.F., Dos Santos Ferreira G.C., Pires M.S.G. Physicochemical and microbiological characteristics of waste foundry sand used in landfills. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. Vol. 194. No. 10. Article 725. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10355-7>
7. Penkaitis G., Sigolo J.B. Waste foundry sand: Environmental implication and characterization. *Geologia USP. Série Científica*. 2012. Vol. 12. No. 3. P. 57—70. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2012000300004>
8. Fore S., Mbohwa C.T. Cleaner production for environmental conscious manufacturing in the foundry industry. *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2010. Vol. 8. Iss. 3. P. 314—333. <https://doi.org/10.1108/17260531011086180>
9. Novák-Szabó T., Sipos A.Á., Shaw S., Bertoni D., Pozzebon A., Grottoli E., Sarti G., Ciavola P., Domokos G., Jerolmack D.J. Universal characteristics of particle shape evolution by bed-load chipping. *Science Advances*. 2018. Vol. 4. Iss. 3. Article eaao4946. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao4946>
10. Meena M., Kumar H., Chaturvedi N.D., Kovalev A.A., Bolshev V., Kovalev D.A., et al. Biomass Gasification and Applied Intelligent Retrieval in Modeling. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 18. Article 6524. <https://doi.org/10.3390/en16186524>
11. Xie J., Zhu Yo. Association between ambient temperature and COVID-19 infection in 122 cities from China. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 724. Article 138201. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138201>
12. Han B., Jin X., Xiang X., Rui S., Zhang X., Jin Z., Zhou Yi. An integrated evaluation framework for Land-Space ecological restoration planning strategy making in rapidly developing area. *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 124. Article 107374. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107374>
13. Amin K.M., Mufti N.A. Investigating cooling curve profile and microstructure of a squeeze cast Al-4%Cu alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. Vol. 212. Iss. 8. P. 1631—1639. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.017>
14. Jiang Zh., Sun Zh., Wang P. Internal relative humidity distribution in high-performance cement paste due to moisture diffusion and self-desiccation. *Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36. Iss. 2. P. 320—325. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.006>
15. Morgado E. Influence of light-soaking and annealing on electron and hole mobility–lifetime products in a-Si:H. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2004. Vols. 338—340. P. 386—389. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.03.004>
16. Fan Z.T., Huang N.Y., Dong X.P. In house reuse and reclamation of used foundry sands with sodium silicate binder. *International Journal of Cast Metals Research*. 2004. Vol. 17. Iss. 1. P. 51—56. <https://doi.org/10.1179/136404604225020551>
17. Wan H., Yuan L., Zhang Y. Insight Into the Leaching of Sodium Alumino-Silicate Hydrate (N-A-S-H) Gel: A Molecular Dynamics Study. *Frontiers in Materials*. 2020. Vol. 7. Article 56. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00056>
18. Dupuis R., Pellenq R., Champenois J.-B., Poulesquen A. Dissociation Mechanisms of Dissolved Alkali Silicates in Sodium Hydroxide. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2020. Vol. 124. Iss. 15. P. 8288—8294. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c01495>
19. Lu Jj., He W., Yang L., Wang H. Reclamation of CO<sub>2</sub> sodium silicate used sands by steam leaching. *China Foundry*. 2023. Vol. 20. P. 537—544. <https://doi.org/10.1007/s41230-023-1174-y>
20. Qiu Yo., Pan H., Zhao Q., Zhang J., Zhang Ya., Guo W. Carbon dioxide-hardened sodium silicate-bonded sand regeneration using calcium carbide slag: The design and feasibility study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10. Iss. 3. Article 107872. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107872>
21. Arias-Gaviria J. Adoption of sea water air conditioning (SWAC) in the Caribbean: Individual vs regional effects. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 227. P. 280—291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.155>
22. Mehta V. Sustainable approaches in concrete production: An in-depth review of waste foundry sand utilization and environmental considerations. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31. Iss. 16. P. 23435—23461. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32785-1>
23. Park C.-L., Kim B.-G., Yu Yo. The regeneration of waste foundry sand and residue stabilization using coal refuse. *Journal of Hazardous Materials*. 2012. Vols. 203—204. P. 176—182. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.100>

24. Ismail A.A.M., Kannadasan K., Pichaimani P., Arumugam H., Muthukaruppan A. Synthesis and characterisation of sodium silicate from spent foundry sand: Effective route for waste utilization. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 264. Article 121689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121689>
25. Qiu Yo., Pan H., Guo W., Xue C., Zhao Q. Feasibility of using pretreated sodium silicate-bonded waste foundry sand as fine aggregates for construction mortar. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 86. Article 108878. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108878>
26. García G., Cabrera R., Rolón J., Pichardo R., Thomas C. Systematic review on the use of waste foundry sand as a partial replacement of natural sand in concrete. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 430. Article 136460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136460>
27. Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідко скляної суміші: пат. 122538 Україна: МПК В22С 9/10, 9/12. № а 201901350; заявл. 11.02.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22. 7 с.
28. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І. Структурування формувальних та стрижневих сумішей за способом паромікрохвильового затвердіння. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2021. № 2. С. 23—31. URL: [https://www.researchgate.net/publication/360219604\\_STRUKTURUVANNA\\_FORMUVALNIH\\_TA\\_STRIZNEVIH\\_SUMISEJ\\_ZA\\_SPOSOBOM\\_PARO-MIKROHVILOVOGO\\_ZATVERDINNA](https://www.researchgate.net/publication/360219604_STRUKTURUVANNA_FORMUVALNIH_TA_STRIZNEVIH_SUMISEJ_ZA_SPOSOBOM_PARO-MIKROHVILOVOGO_ZATVERDINNA) (дата звернення: 09.04.2026).
29. Solonenko L.I., Rapiakh S.I., Uzlov K.I., Mamuzich I., Bilyi O.P., Kimstach T.V. Water resistance of structured sand-sodium-silicate mixtures. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 4. P. 41—46. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-4/041>
30. Burkowicz A., Galos K., Guzik K. The Resource Base of Silica Glass Sand versus Glass Industry Development: The Case of Poland. *Resources*. 2020. Vol. 9. Iss. 11. Article 134. <https://doi.org/10.3390/resources9110134>



## REFERENCES

1. Sgarlata, C., Ariza-Tarazona, M. C., Paradisi, E., Siligardi, C., & Lancellotti, I. (2023). Use of Foundry Sands in the Production of Ceramic and Geopolymers for Sustainable Construction Materials. *Applied Sciences*, 13(8), article 5166. <https://doi.org/10.3390/app13085166>
2. Gedik, A., Lav, A. H., & Lav, M. A. (2018). Investigation of alternative ways for recycling waste foundry sand: an extensive review to present benefits. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45(6), 423-434. <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0183>
3. Mhaya, A. M., Shahidan, S., Goel, A., & Huseien, G. F. (2024). Effect of metakaolin content and shape design on strength performance of lightweight rubberized geopolymer mortars incorporated slag-waste glass powders. *Construction and Building Materials*, 432, article 136500. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136500>
4. Boukherroub, T., D'amours, S., & Rönnqvist, M. (2018). Sustainable forest management using decision theaters: rethinking participatory planning. *Journal of Cleaner Production*, 179, 567-580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.084>
5. Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
6. Domingues, L. G. F., Dos Santos Ferreira, G. C., & Pires, M. S. G. (2022). Physicochemical and microbiological characteristics of waste foundry sand used in landfills. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(10), article 725. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10355-7>
7. Penkaitis, G., & Sígolo, J. B. (2012). Waste foundry sand: Environmental implication and characterization. *Geologia USP. Série Científica*, 12(3), 57-70. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2012000300004>
8. Fore, S., & Mbohwa, C. (2010). Cleaner production for environmental conscious manufacturing in the foundry industry. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 8(3), 314-333. <https://doi.org/10.1108/17260531011086180>
9. Novák-Szabó, T., Sipos, A. Á., Shaw, S., Bertoni, D., Pozzebon, A., Grottoli, E., Sarti G., Ciavola P., Domokos G., & Jerolmack, D. J. (2018). Universal characteristics of particle shape evolution by bed-load chipping. *Science. Advances*, 4(3), article eaao4946. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao4946>
10. Meena, M., Kumar, H., Chaturvedi, N. D., Kovalev, A. A., Bolshev, V., Kovalev, D. A., et al. (2023). Biomass Gasification and Applied Intelligent Retrieval in Modeling. *Energies*, 16(18), article 6524. <https://doi.org/10.3390/en16186524>
11. Xie, J., & Zhu, Yo. (2020). Association between ambient temperature and COVID-19 infection in 122 cities from China. *Science of The Total Environment*, 724, article 138201. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138201>
12. Han, B., Jin, X., Xiang, X., Rui, S., Zhang, X., Jin, Z., & Zhou, Yi. (2021). An integrated evaluation framework for Land-Space ecological restoration planning strategy making in rapidly developing area. *Ecological Indicators*, 124, article 107374. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107374>
13. Amin, K. M., & Mufti, N. A. (2012). Investigating cooling curve profile and microstructure of a squeeze cast Al-4%Cu alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(8), 1631-1639. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.017>

14. Jiang, Zh., Sun, Zh., & Wang, P. (2006). Internal relative humidity distribution in high-performance cement paste due to moisture diffusion and self-desiccation. *Cement and Concrete Research*, 36(2), 320-325. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.006>
15. Morgado, E. (2004). Influence of light-soaking and annealing on electron and hole mobility–lifetime products in a-Si:H. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 338-340, 386-389. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.03.004>
16. Fan, Z. T., Huang, N. Y., & Dong, X. P. (2004). In house reuse and reclamation of used foundry sands with sodium silicate binder. *International Journal of Cast Metals Research*, 17(1), 51-56. <https://doi.org/10.1179/136404604225020551>
17. Wan, H., Yuan, L., & Zhang, Y. (2020). Insight Into the Leaching of Sodium Alumino-Silicate Hydrate (N-A-S-H) Gel: A Molecular Dynamics Study. *Frontiers in Materials*, 7, article 56. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00056>
18. Dupuis, R., Pellenq, R., Champenois, J.-B., & Poulesquen, A. (2020). Dissociation Mechanisms of Dissolved Alkali Silicates in Sodium Hydroxide. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124(15), 8288–8294. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c01495>
19. Lu, Jj., He, W., Yang, L., & Wang, H. (2023). Reclamation of CO<sub>2</sub> sodium silicate used sands by steam leaching. *China Foundry*, 20, 537-544. <https://doi.org/10.1007/s41230-023-1174-y>
20. Qiu, Yo., Pan, H., Zhao, Q., Zhang, J., Zhang, Ya., & Guo, W. (2022). Carbon dioxide-hardened sodium silicate-bonded sand regeneration using calcium carbide slag: The design and feasibility study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), article 107872. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107872>
21. Arias-Gaviria, J. (2019). Adoption of sea water air conditioning (SWAC) in the Caribbean: Individual vs regional effects. *Journal of Cleaner Production*, 227, 280-291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.155>
22. Mehta, V. (2024). Sustainable approaches in concrete production: An in-depth review of waste foundry sand utilization and environmental considerations. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(16), 23435-23461. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32785-1>
23. Park, C.-L., Kim, B.-G., & Yu, Yo. (2012). The regeneration of waste foundry sand and residue stabilization using coal refuse. *Journal of Hazardous Materials*, 203-204, 176-182. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.100>
24. Ismail, A. A. M., Kannadasan, K., Pichaimani, P., Arumugam, H., & Muthukaruppan, A. (2020). Synthesis and characterisation of sodium silicate from spent foundry sand: Effective route for waste utilization. *Journal of Cleaner Production*, 264, article 121689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121689>
25. Qiu, Yo., Pan, H., Guo, W., Xue, C., & Zhao, Q. (2024). Feasibility of using pretreated sodium silicate-bonded waste foundry sand as fine aggregates for construction mortar. *Journal of Building Engineering*, 86, article 108878. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108878>
26. García, G., Cabrera, R., Rolón, J., Pichardo, R., & Thomas, C. (2024). Systematic review on the use of waste foundry sand as a partial replacement of natural sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 430, article 136460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136460>
27. Method for manufacturing casting molds and rods from a liquid glass mixture: pat. 122538 Ukraine: MPK B22C 9/10, 9/12. № a 201901350; announced 11.02.2019; published 25.11.2020, Bul. № 22. 7 p. [in Ukrainian].
28. Solonenko, L., Repyakh, S., & Uzlov, K. (2021). Mold and rod mixtures structuring by steam-microwave solidification method. *Metal Journal*, (2), 23-31. [https://www.researchgate.net/publication/360219604\\_STRUKTURUVANNA\\_FORMUVALNIH\\_TA\\_STRIZNEVIH\\_SUMISEJ\\_ZA\\_SPOSOBOM\\_PARO-MIKROHVILOVOGO\\_ZATVERDINNA](https://www.researchgate.net/publication/360219604_STRUKTURUVANNA_FORMUVALNIH_TA_STRIZNEVIH_SUMISEJ_ZA_SPOSOBOM_PARO-MIKROHVILOVOGO_ZATVERDINNA) [in Ukrainian].
29. Solonenko, L. I., Repiakh, S. I., Uzlov, K. I., Mamuzich, I., Bilyi, O. P., & Kimstach, T. V. (2021). Water resistance of structured sand-sodium-silicate mixtures. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 41-46. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-4/041>
30. Burkowicz, A., Galos, K., & Guzik, K. (2020). The Resource Base of Silica Glass Sand versus Glass Industry Development: The Case of Poland. *Resources*, 9(11), article 134. <https://doi.org/10.3390/resources9110134>

Надійшла/Received 10.04.2026

Прийнята/Accepted 13.05.2026

Опублікована/Published 29.05.2026

## Summary

**L.I. Solonenko**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Engin.), Associate Professor, Professor at the Department of Civil Safety and Occupational Safety and Health, e-mail: solonenkoli14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>  
**S.I. Repyakh**<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor at the Department of Casting Production, e-mail: 123rs@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>  
**O.P. Bilyi**<sup>2</sup>, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Casting Production, e-mail: baplitvo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1234-5404>

<sup>1</sup>Odesa Polytechnic National University (Odesa, Ukraine)

<sup>2</sup>Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro, Ukraine)

## Regeneration and Alternative Utilization of Spent Sand-Sodium Silicate Mixtures Structured via Sodium Silicate Dehydration

**Relevance.** The relevance of this work is driven by the urgent need to mitigate the environmental impact of spent foundry molding sands and to develop high-efficiency, low-energy, and resource-saving reclamation technologies.

**Results.** It was established that the water resistance of sand-sodium silicate mixtures structured by dehydration exhibits an inversion-type dependence on the sodium silicate content and the duration of MW-structuring (microwave structuring). This behavior is attributed to the competitive processes between the formation and dehydration of silicate bridges (cuffs). It is shown that the structural degradation in water follows a diffusion-kinetic mechanism and is determined by temperature, water volume, and binder content. A generalized parameter  $\Theta_{SMS}$  is proposed to synthesize the influence of composition and structuring regimes on the system's properties. It was found that strength, water resistance, and hydro-regeneration duration are described by monotonic exponential functions with asymptotic saturation relative to  $\Theta_{SMS}$  parameter. An analytical model for estimating the neutralizing agent consumption was developed with a margin of error within 10 %. The study demonstrates the feasibility of effective hydro-regeneration using limited water volumes and subsequent reuse of the mixture.

**Scientific Novelty.** For the first time, a generalized dimensionless parameter  $\Theta_{SMS}$  has been introduced. This parameter integrates the sodium silicate dosage and its degree of dehydration, defining the structural state and the complex of properties of sand-sodium silicate mixtures structured by dehydration. A unified correlation between strength, water resistance, and hydro-regeneration duration via the  $\Theta_{SMS}$  parameter was established and interpreted as a percolation-type transition within the intergranular silicate framework.

**Practical Significance.** The findings allow for the optimization of MW-structuring and hydro-regeneration regimes for dehydration-structured sand-sodium silicate mixtures. This ensures a reduction in water, energy, and binder consumption while maintaining the required level of technological properties.

## Keywords

Sand-sodium silicate mixtures, hydro-regeneration, water resistance, silicate bridges, dehydration, resource conservation, secondary raw materials.