

УДК 621.74

**Л. І. Солоненко**, кан. техн. наук, доцент; e-mail: solonenkoli14@gmail.com;  
ORCID 0000-0003-2092-8044

Державний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

## ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ СТРУКТУРУВАННЯ ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНОЇ СУМІШІ У ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Надано результати досліджень впливу маси рідкого скла, яку витрачено на плакування кварцового піску, маси води у водяних зарядах та місця їх розташування в робочому просторі модельно-стрижневого оснащення на міцність піщано-рідкоскляної суміші, яку структурували за способом паро-мікрохвильового затвердіння. В роботі використовували прісну воду технічної чистоти, натрієве рідке скло з питомою щільністю  $\rho_{PC} = 1,42 \text{ г/см}^3$  і силікатним модулем  $M_{SiO_2} = 2,9$ , кварцовий пісок із середнім розміром часток  $0,23 \text{ мм}$  і з масовим вмістом глини до  $0,1 \%$ . Кварцовий пісок плакували рідким склом, шляхом його механічного перемішування з рідким склом та сушінням на повітрі до сипучого стану. Структурування піщано-рідкоскляної суміші проводили за способом паро-мікрохвильового затвердіння у мікрохвильовій печі з потужністю магнетрона  $700 \text{ Вт}$  та частотою  $2,45 \text{ ГГц}$ . Встановлено, що підвищенню міцності ливарних форм і стрижнів, що виготовляють за способом паро-мікрохвильового затвердіння, сприяє як збільшення маси рідкого скла, використаного для плакування кварцового піску, так і маси води в водяному заряді. З метою забезпечення рівномірності міцності по тілу ливарних форм і стрижнів, водяний заряд слід розташовувати переважно в нижніх і тупикових частинах використовуваного оснащення з урахуванням напрямку руху водяної пари по відношенню до місць її виходу з суміші при її структуруванні.

**Ключові слова:** пісок, рідке скло, суміш, вода, форма, оснащення, міцність, паро-мікрохвильове затвердіння.

### Вступ

В даний час для виготовлення одноразових ливарних форм і стрижнів (ЛФС) часто використовують суміш кварцового піску і натрієвого рідкого скла (РС), як найбільш дешевий, доступний, технологічний і екологічно безпечний сполучний матеріал [1]. При цьому, унікальні властивості РС дозволяють його отверджувати в піщано-рідкоскляних сумішах (ПРС) як хімічними [2], так і фізичними методами [3].

Хімічний метод реалізують шляхом примусового продування ПРС вуглекислим газом [4], або його сумішшю з повітрям [5], шляхом введення в ПРС порошкових (ферохромовий шлак, нефеліновий шлак, доменний шлак, цемент і ін.) [6] або рідких (етіленглікольмоноацетат, етіленглікольдіацетат, гліцерінацетат і ін.) [6, 7] матеріалів-реагентів.

Особливістю хімічного методу є об'ємний характер затвердіння ПРС, що проходить практично без видалення з неї вологи. При цьому час структурування ПРС (затвердіння РС) регулюють в широких межах (від 2...5 хв до 2-х годин), що забезпечує застосовуваному оснащенню хорошу оборотність і дозволяє використовувати ПРС на автоматизованих формувальних лініях. Проте, високий вміст залишкової вологи в таких структурованих ПРС часто призводить до виникнення на виливках значної кількості дефектів поверхні, в числі яких газові раковини, шорсткість, механічний пригар та ін.

Фізичні методи затвердіння засновані на зневодненні (дегідратації) РС, яке до-

сягають пров'ялюванням ЛФС на повітрі [8] або продуванням суміші повітрям в оснащенні [9], поверхневим сушінням з підведенням тепла ззовні через поверхню ЛФС [10, 11], глибинним сушінням мікрохвильовим (надвисокочастотним – НВЧ) випромінюванням [6, 12]. Особливістю зазначених вище фізичних методів затвердіння є спрямоване від поверхні в глиб ЛФС просування фронту дегідратації, а в разі мікрохвильової сушки нагріву – з глибин (від центру) до поверхні ЛФС. Фізичним методом властива велика тривалість процесу, а в разі використання мікрохвильового випромінювання – низька початкова міцність ЛФС в момент вилучення з оснащення, що, відповідно, потребує збільшення тривалості сушіння в мікрохвильовій печі.

Відомі також і комбіновані (фізико-хімічні) способи затвердіння ЛФС, що поєднують продування ПРС в оснащенні сумішшю вуглекислого газу і повітря безпосередньо в камерному сушиллі, що прискорює процес затвердіння та ін. Зокрема, спосіб, названий авторами [13] «термо-шок-СО<sub>2</sub>-процес», включає нагрів металевого оснащення до 150...350 °С, заповнення та ущільнення в ній ПРС, витримку ПРС в контакт з нагрітою поверхнею оснащення, продування ПРС вуглекислим газом, холодним або підігрітим повітрям з вмістом в ньому вуглекислого газу в кількості 10...80 %. Даному способу [13], як і іншим комбінованим способам структурування ПРС, де використовують вакуумування ПРС, обробку ПРС електричним струмом і т.п., притаманний один суттєвий недолік – вкрай низька технологічність. З цієї причини в ливарних цехах комбіновані способи структурування ПРС в даний час застосовують дуже обмежено і лише за умови одиничного випуску лиття.

Загальним для описаних вище методів затвердіння є необхідність використання свіжоприготовленої ПРС з високою вологістю, і, за винятком наливних самотвердіючих сумішей, необхідність їх ущільнення шляхом ручного або механізованого трамбування.

На сьогоднішній день, найбільш широко застосовуваним способом виготовлення ЛФС з ПРС є СО<sub>2</sub>-процес. Відповідно до даного способу проводять приготування ПРС (кварцовий пісок з 5...7 % РС), заповнення ПРС модельно-стрижневого оснащення, ущільнення ПРС трамбуванням і її затвердіння (структурування) за рахунок продування вуглекислим газом впродовж 2...5 хв [14]. Недоліками даного способу є: складність або неможливість виготовлення тонкостінних фасонних стрижнів, що обумовлено низькою плинністю суміші і, відповідно, необхідністю її ущільнення шляхом трамбування; нерівномірність технологічних і механічних властивостей ЛФС, що є наслідком нерівномірної обробки різних частин ЛФС вуглекислим газом; низька початкова міцність ЛФС, що вимагає їх витримки на повітрі від 6 до 24 годин і обумовлена незавершеністю процесу затвердіння РС в глибинних частинах структурованої суміші; висока газотвірна здатність ЛФС, викликана затвердінням РС без видалення з нього води; тривалість і енергоємність виготовлення ЛФС, що виникає в разі необхідності їх додаткової теплової сушки; висока обсипальність при зберіганні, що є наслідком взаємодії вуглекислого газу повітря з РС і збільшенням ступеня його карбонізації в поверхневому шарі ЛФС; підвищена витрата РС в разі потреби виготовлення ЛФС з високою міцністю; складність і трудомісткість вибивання стрижнів з виливків, що може бути зумовлено високою міцністю прилеглих до виливка поверхневих шарів ПРС, невисокою твердістю сплаву виливка, наявністю механічного пригару на поверхні виливків.

За даними [15] спосіб виготовлення ЛФС з ПРС, що включає заповнення модельно-стрижневого оснащення ПРС, її ущільнення, твердіння (структурування) під час її продування газом-отверджувачем з температурою 60...180 °С з одного боку модельно-стрижневого оснащення з одночасним відбором його, з іншого боку шляхом вакуумування. Істотними недоліками даного способу є: складність або неможливість виготовлення тонкостінних фасонних стрижнів, що обумовлено низькою плинністю суміші і, відповідно, необхідністю її ущільнення трамбуванням; нерівномірність властивостей різних частин ЛФС, що може привести до поломки і значної обсипальності ЛФС, браку виливків через поверхневі дефекти.

За способом [16] ЛФС виготовляють з сухої суміші з розчинним у воді сполучним матеріалом або вогнетривким матеріалом, плакованим розчинним у воді сполучним матеріалом. Тобто, спосіб [16] включає заповнення модельно-стрижневого оснащення сухою сумішшю (кварцовим піском, який плаковано РС), ущільнення суміші вібрацією і подачу в суміш водяної пари. При цьому подачу водяної пари в суміш здійснюють одночасно з обробкою суміші мікрохвильовим випромінюванням.

Під час мікрохвильового впливу з водяного заряду (ВЗ) починає випаровуватися вода, перетворюючись в насичену пару. Проходячи по капілярних каналах суміші, водяна пара конденсується на їх поверхнях, яка під дією мікрохвильового випромінювання нагрівається і випаровується, що призводить до підвищення температури суміші. Повторення процесу конденсації-випаровування між молекулами пари і її конденсату призводить не тільки до підвищення температури суміші, а й до тимчасового насичення водою силікату натрію на поверхні піщинок і його переходу в рідкорухливий стан. Виникле таким чином РС самостійно переміщується під дією капілярних сил до точок міжзернового зіткнення в суміші. Заповнюючи міжзерновий простір, РС утворює між зернами піску рідкі манжети. Після досягнення сумішшю точки роси, конденсація пари в капілярах припиняється. З цього моменту вода, що знаходиться в капілярах у вільному стані, випаровується, а з РС випаровуються залишки пов'язаної (гідратної) води. Ці процеси призводять до того, що манжети між зернами піску з рідкорухливої рідчини перетворюються в твердий зневоднений силікат натрію. На цьому процес структурування матеріалу ЛФС за способом паро-мікрохвильового затвердіння (ПМЗ) завершується.

Таким чином, суть способу ПМЗ полягає в тому, що сухий, плакований водорозчинним сполучним матеріалом, пісок засипають і ущільнюють в модельно-стрижневому оснащенні, в якому попередньо розміщують один і більше ВЗ ( ВЗ – це дозована за масою кількість води, якою, наприклад, просочують поліуретанову губку, гіпс і т. п.), віброущільнюють плакований пісок і обробляють мікрохвильовим випромінюванням. При цьому ВЗ розміщують в робочому просторі модельно-стрижневого оснащення або

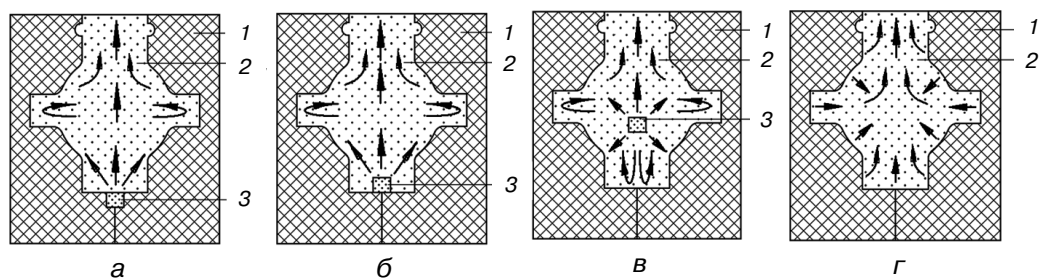


Рис. 1. Схема внутрішнього розміщення водяного заряду поза межами робочої порожнини стрижневого ящика (а), в робочій порожнині стрижневого ящика (б), всередині стрижня (в), на поверхні робочої порожнини стрижневого ящика (г) з виходом пари зі стрижневого ящика через контактуючу з ним поверхню суміші: 1 – стрижневий ящик; 2 – стрижнева суміш; 3 – водяний заряд

у стрижневому ящику відповідно до однієї зі схем, які надано на рис. 1 та 2.

Заповнене плакованим піском оснащення встановлюють у робочий простір мікрохвильової печі і залежно від маси і габаритів ЛФС обробляють мікрохвильовим випромінюванням протягом 2... 15 хв.

Виготовлені ЛФС по даному технічному рішенню відразу після виготовлення придатні до використання, оскільки мають високу міцність і газопроникність, практично не містять вологи і, відповідно, практично не газотвірні. Пропонованим способом можна виготовляти ЛФС будь-якої складності, а їх обмеження за масою і розмірами будуть обумовлені тільки вантажопідйомністю і розмірами робочого простору мікрохвильової камери, що використовується.

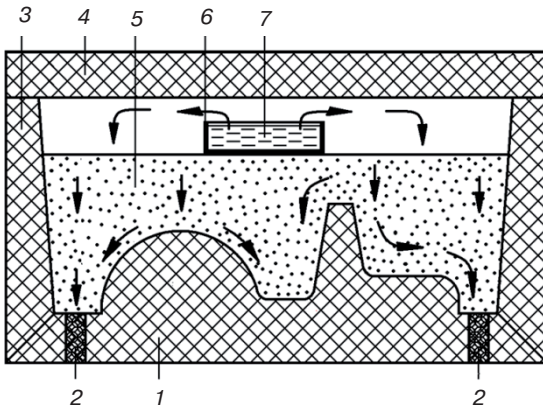


Рис. 2. Схема внутрішнього розміщення водяного заряду поза межами робочої порожнини модельно-стрижневого оснащення з горизонтальним формуванням і надходженням пара в суміш через її вільну поверхню: 1 – підмодельна плита з моделлю; 2 – вента; 3 – опока; 4 – кришка; 5 – формувальна суміш; 6 – пластмасова, фарфорова або скляна ємність; 7 – вода

стану та протягом 3 хв в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрона 700 Вт та частотою випромінювання 2,45 ГГц. Перед структуруванням незалежно від способу сушіння плакований пісок просіювали через сито з розміром сторін його осередку у світлі 0,4 мм.

Структурування плакованого піску в паро-мікрохвильовому середовищі здійснювали з використанням ВЗ – наважки води масою 1, 2 та 3 г, якою просочували поліуретанову губку з розмірами  $\varnothing 15 \times 10$  мм. Структурування сумішей проводили в картонних стаканах, що схематично надано на рис. 3, де напрямок виходу пари з суміші у навколишнє середовище вказано стрілками бузкового кольору.

Відповідно до рис. 3 ВЗ розташовували: на дні стакана з виходом водяної пари з відкритої поверхні суміші (див. рис. 3, а); у верхній частині стакана з виходом пари через венти (див. рис. 3, б); посередині стакану з виходом пари через відкриту поверхню суміші (див. рис. 3, в); посередині стакану з виходом пари через венти (див. рис. 3, г); посередині стакану з виходом пари одночасно у двох напрямках (див. рис. 3, д) через венти та відкриту поверхню суміші.

Маса плакованого піску у стакані у всіх випадках дорівнювала 400 г. Ущільнювали суміш в стаканах на вібраційному столі з частотою коливань 50 Гц і амплітудою 0,8...1,0 мм. Для структурування картонні стакани, наповнювали плакованим кварцовим піском, встановлювали в резонатор (робочу камеру) мікрохвильової печі на середину обертового столу та обробляли мікрохвильовим випромінюванням протягом 5 хв.

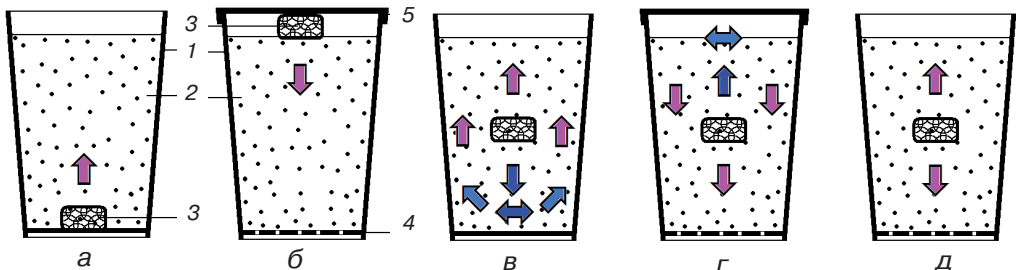


Рис. 3. Схема розміщення в стакані ВЗ на дні (а), у верхній частині (б), посередині – вихід пари з відкритої поверхні (в), посередині – вихід пари з вент (г), посередині – вихід пари у двох напрямків (д): 1 – картонний стакан; 2 – ПРС; 3 – ВЗ; 4 – венти; 5 – герметична кришка

Однак, на сьогодні відсутні дані щодо міцності ПРС, що структуровані за ПМЗ-процесом, від числа та характеру розміщення ВЗ в робочому просторі модельно-стрижневого оснащення.

*Матеріали і методика досліджень.* У роботі використовували прісну воду технічної чистоти, РС з питомою щільністю  $\rho_{PC} = 1,42$  г/см<sup>3</sup> і силікатним модулем  $M_{SiO_2} = 2,9$ , кварцовий пісок із середнім розміром часток 0,23 мм і з масовим вмістом глини до 0,1 %. Масу визначали на електронних вагах з точністю 0,1 і 0,01 г.

Для структурування в паро-мікрохвильовому середовищі використовували кварцовий пісок попередньо плакований 0,5 %, 1,5 % та 2,5 % РС (за масою, понад 100 % кварцового піску). Для цього, після змішування РС з кварцовим піском суміш сушили на повітрі до сипучого

Межу міцності на тиск визначали на приладі LRU-2e. Випробування проводили на зразках кубічної форми з розміром ребра ~20 мм, які вирізали з заготовок структурованих сумішей. Розміри зразків визначали з використанням штангенциркуля з точністю 0,1 мм. При розташуванні ВЗ в центрі картонного стакану, зразки для випробувань на стикування вирізали з шарів, нумерацію яких зображено на рис. 4.

Вплив положення ВЗ в стрижневому ящику на міцність натиск структурованої суміші визначали на зразках, вирізаних з центральної частини полого стрижня масою 4 кг відповідно до схеми на рис. 5, де також представлено схему нумерації секторів вирізки зразків для випробувань.

Для виготовлення пустотілого стрижня на дно поліуританового стрижневого ящика 2 (див. рис. 5) укладали ВЗ 3 з масою води в кожному по 1 г. Після цього стрижневий ящик доверху наповнювали кварцовим піском 2, який було плаковано 1 % РС, висушеним на повітрі до сипучого стану і додатково просушеним протягом 3 хв в мікрохвильовій печі. Заповнену опоку встановлювали на вібростіл з частотою вібрації 50 Гц, амплітудою 0,8 ... 1,0 мм, де ущільнювали плакований пісок протягом 1 хв. Для структурування стрижневий ящик поміщали в центр робочого столу мікрохвильової печі і обробляли мікрохвильовим випромінюванням протягом 20 хв. Після закінчення структурування стрижневий ящик витягували з мікрохвильової печі, а стрижень витрушували з стрижневого ящика.

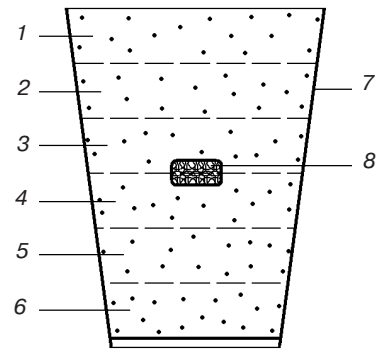


Рис. 4. Схема нумерації шарів: 1 ... 6 – шари структурованої суміші; 7 – картонний стакан; 8 – ВЗ

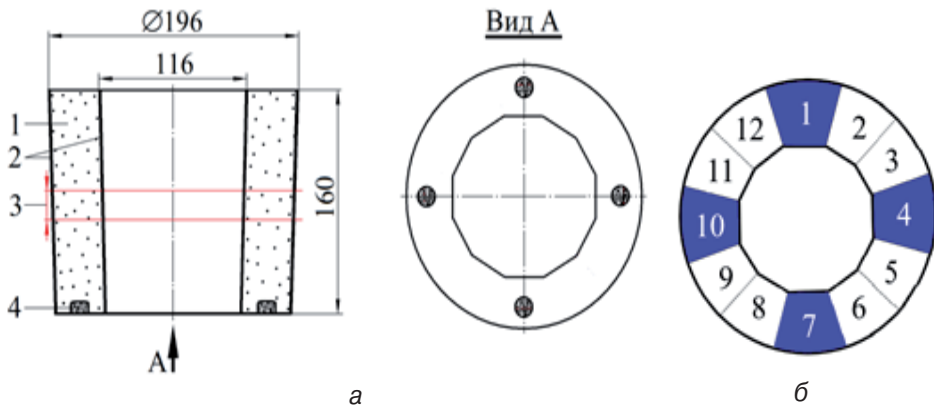


Рис. 5. Схема розташування ВЗ в стрижневому ящику (а), нумерація секторів (б) виміру міцності суміші на тиск, де синім кольором виділено сектори, під якими розташовані ВЗ на дніщі стрижневого ящика: 1 – ПРС; 2 – поліуретановий стрижневий ящик; 3 – шар стрижня для вирізки зразків; 4 – ВЗ

Після закінчення охолодження на повітрі з центральної частини стрижня випилювали шар суміші (див. рис. 5, а), з якого відповідно до рис. 5, б виготовляли зразки кубічної форми.

**Результати досліджень.** Вплив маси ВЗ, який було розташовано на дні і в верхній частині стакану (див. рис. 3, а, б), на міцність на тиск зразків, структурованих за ПМЗ-процесом з кварцового піску, плакованого 0,5 %, 1,5 % і 2, 5 % РС, представлено у вигляді відповідних залежностей на рис. 6.

З аналізу ходу кривих на рис. 6 випливає, що незалежно від положення ВЗ в

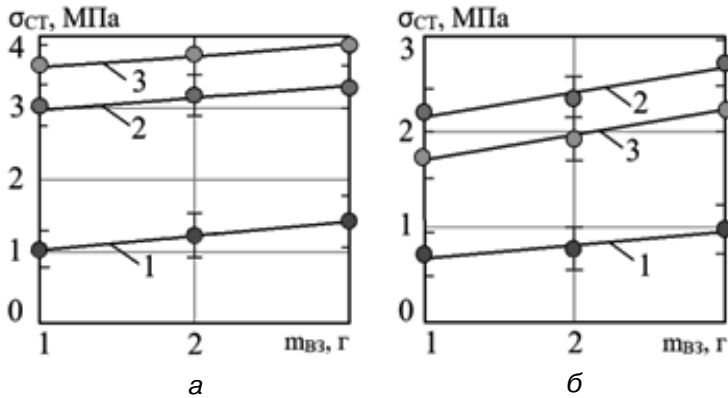


Рис. 6. Вплив маси ВЗ розташованого на дні (а) і у верхній частині (б) стакану на міцність на тиск зразків, структурованих за ПМЗ-процесом: 1 – суміш з 0,5 % РС; 2 – суміш з 1,5 % РС; 3 – суміш з 2,5 % РС

стакані зі збільшенням маси ВЗ, а так само зі збільшенням маси РС в кварцовому піску, міцність структурованої суміші збільшується. При цьому у зразках, суміш яких була структурована з розташуванням ВЗ в донній частині стакану, міцність дещо вища, ніж у зразків із суміші структурованої при верхньому розташуванні ВЗ в стакані.

Мабуть, дана закономірність обумовлена тим, що при нижньому розташуванні ВЗ рух водяної пари з ВЗ знаходиться в протиході з гравітаційним мікропереміщенням частинок суміші до фронту структурування, що, в свою чергу, сприяє не тільки ущільненню структурованої суміші, а й, відповідно, збільшенню її міцності.

Вплив напрямків виходу водяної пари при розташуванні ВЗ з масою води 2 г в середині стакану на міцність структурованої суміші з 2,5 % РС (по шарах зразка відповідно до рис. 3, в, г, д і рис. 2), представлено на рис. 7.

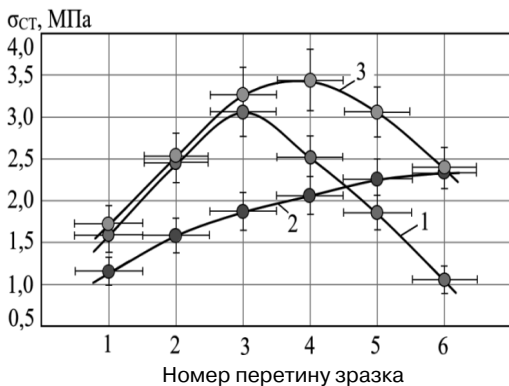


Рис. 7. Вплив ВЗ, розташованого посередині стакану, з виходом пари у верхній частині стакану (1), нижньої частини стакану (2) і в обох напрямках (3) на міцність зразків по шарах

З аналізу ходу кривих 1 і 3 на рис. 7 випливає, що при виході водяної пари через вільну поверхню суміші, а також через вільну поверхню і венті в днищі стакану найбільшу міцність набувають центральні шари суміші, тобто шари, які найближче розташовані до ВЗ.

У той же час, вихід пари тільки через венті в днищі стакану призводить до монотонного збільшення міцності суміші від верхніх до нижніх шарів. Така закономірність, мабуть, пояснюється особливостями газодинаміки потоків водяної пари в різних шарах суміші, процесів його конденсації і випаровування в досліджуваних закритих просторах, що, тим не менш, слід враховувати при

розробці технології виробництва форм і стрижнів за ПМЗ-процесом.

Вплив розташування ВЗ на міцність на тиск визначали на стрижні масою 4 кг, структурованого за ПМЗ-процесом, вид якого представлено на рис. 8.

Відповідно до прийнятої методики досліджень, вплив розташування ВЗ в стрижневому ящику на міцність на тиск структурованої суміші визначали на зразках кубічної форми, вирізаних із сегментів (див. рис. 5, б) центрального шару стрижня. Результати досліджень представлено у вигляді графіка на рис. 9.

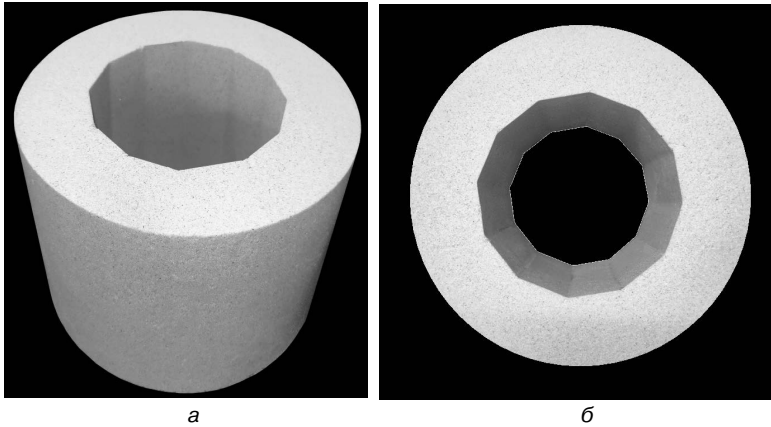


Рис. 8. Загальний вигляд (а) і вид зверху (б) полого стрижня масою 4 кг, структурованого за ПМЗ-процесом

Як видно з рис. 9, міцність зразків, вирізаних із сегментів розташованих безпосередньо над ВЗ, вище, ніж в суміжних, і становить 1,6...1,8 МПа. Найменшою міцністю характеризуються ділянки суміші найбільш віддалені від зазначених вище сегментів. При цьому, різниця у величинах міцності в даному випадку сягає ~ 1,8 рази. Мабуть, така різниця в величинах міцності пов'язана з напрямком руху водяної пари в напрямку до вільної поверхні суміші в стрижневому ящику. Тобто, вода в ВЗ, нагріваючись, перетворюється на пару і по капілярах прагне до відкритої поверхні найкоротшим шляхом з найменшим опором. Мабуть, ці особливості процесу масопереносу призводять до явно вираженої спрямованості руху водяної пари від ВЗ до вільної поверхні суміші та, відповідно, до нерівномірності міцності суміші в перерізі полого стрижня.

Проте, навіть такий рівень нерівномірності міцності є допустимим оскільки мінімальне значення міцності структурованої суміші становить 0,95 МПа, що є достатнім для формувальних і стрижневих сумішей при виробництві дрібних і середніх виливків.

Слід зазначити, що на відміну від об'ємно-структурованих ПРС дегідратування РС за ПМЗ-процесом йде послідовно в напрямку від джерела надходження в суміш водяної пари – ВЗ. Ця обставина позначається не тільки на тривалості процесу структурування, на величині міцності структурованих сумішей, але і на характері зміни їх міцності від маси використаного в суміші РС, що впливає з ходу залежностей на рис. 10.

### Висновки

• Особливістю ливарних форм і стрижнів, що виготовляють за ПМЗ-процесом, є залежність

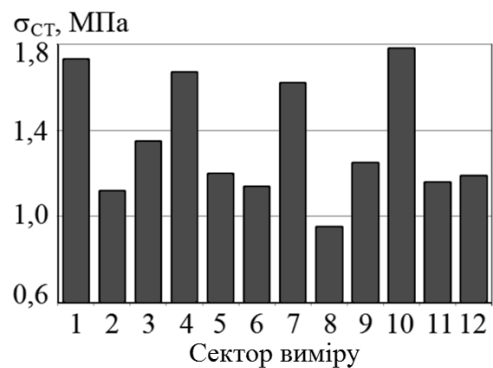


Рис. 9. Діаграма міцності на тиск за секторами виміру

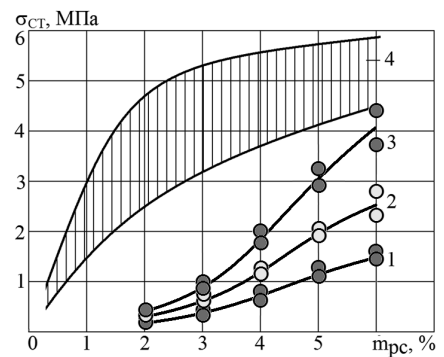


Рис. 10. Залежність міцності на тиск стискані ПРС залежно від способу їх структурування: 1 – продування вуглекислим газом (CO<sub>2</sub>-процес, через 1 годину після продувки); 2 – отверджувач – пілоподібний ферохромовий шлак (через 24 години з моменту закінчення ущільнення суміші); 3 – сушка при 210...230 °С протягом 2 годин; 4 – ПМЗ-процес (через 5–10 хвилин після закінчення структурування)

їх міцності як від місця розташування водяного заряду в оснащенні, що використовується, так і напрямку руху водяної пари в суміші в процесі її обробки мікрохвильовим випромінюванням.

- Найбільшою міцністю і її рівномірністю характеризуються суміші, для структурування яких використовують розташування водяного заряду в нижніх частинах оснастки, тобто при забезпеченні руху водяної пари, що генерується з водяного заряду, знизу вгору. Ця закономірність обумовлена двома факторами:

- Послідовним характером затвердіння ПРС за ПМЗ-процесом за рахунок просування в ній фронту структурування в напрямку від використовуваного (використовуваних) водяного заряду;

- Різноспрямованістю дії гравітації на незв'язані між собою частинки суміші в оснащенні і напрямком переміщення фронту структурування суміші під час паро-мікрохвильового впливу на неї.

- Підвищенню міцності ливарних форм і стрижнів, що виготовляють за ПМЗ-процесом, сприяє як збільшення маси рідкого скла, використаного для плакування кварцового піску, так і маси води в водяному заряді. З метою забезпечення рівномірності міцності по тілу ливарних форм і стрижнів, водяний заряд слід розташовувати переважно в нижніх і тупикових частинах оснащення, що використовують, з урахуванням напрямку руху водяної пари по відношенню до місць її виходу з суміші при її структуруванні.

### Список літератури

- 1 Гуминский Ю. Ю., Ровин С. Л. Экологически чистое модифицированное ультрадисперсным материалом жидкостекольные связующие. *Литье и металлургия*. 2019. № 3. С. 41–45. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-3-41-45.
- 2 Шубина М. В., Косарева Э. А. Эффективность применения жидкостекольных смесей в литейном производстве. *Теория и технология металлургического производства*. 2012. № 11. С. 108–117.
- 3 Крутилин А. Н., Гуминский Ю. Ю. Повышение эффективности использования жидкостекольных смесей. Ч. 2. Электрофизические способы воздействия. *Литье и металлургия*. 2018. № 2 (91). С. 50–56.
- 4 Ткаченко С. С., Кривицкий В. С., Емельянов В. О., Мартынов К. В. Возможность применения жидкостекольных формовочных и стержневых смесей в художественном литье. *Литье и металлургия*. 2017. № 2 (87). С. 12–14.
- 5 Белабров Е. А., Карпенкова О. Л., Белобров Л. Е., Белобров Е. Л., Белобров К. Е. Вспомним забытые технологии: отверждение стержней и форм из жидкостекольной смеси воздушно-углекислотной смесью. *Литье Украины*. 2017. № 12. С. 23–31.
- 6 Кукуй Д. М., Скворцов В. А., Андрианов Н. В. Теория и технология литейного производства. В 2 ч. Ч. 1. Формовочные материалы и смеси. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2011. 384 с.
- 7 Давиденко А. К., Иванов Б. К., Охрименко Г. П., Пономаренко О. И. Самотвердеющие жидкостекольные формовочно-стержневые смеси для изготовления отливок энергетического оборудования. *Металл и литье Украины*. 2018. № 3–4. С. 34–39.
- 8 Белобров Е. А., Карпенкова О. Л., Белобров Л. Е., Белобров Е. Л. Вспомним забытые технологии: формы из жидкостекольных смесей, отверждаемые на воздухе и при помощи переносных колпаковых газовых или электровентиляторных сушил. *Литье Украины*. 2016. № 2 (186). С. 20–22.
- 9 Способ сушки литейных форм: а.с.64501 СССР; № 35415; заявл. 20.09.1940; опубл. 30.04.1945. 1 с.
- 10 Белабров Е. А., Карпенкова О. Л., Белобров Л. Е., Белобров К. Е., Белобров Е. Л. Вспомним забытые технологии: упрочнение литейных форм инфокрасными и переносными электрическими сушилами. *Литье Украины*. 2019. № 4. С. 24–27.
- 11 Белабров Е. А., Карпенкова О. Л., Белобров Л. Е., Белобров Е. Л. Вспомним забытые технологии: отверждение форм и стержней из жидкостекольной смесей теплом в камерных сушилах. *Литье Украины*. 2016. № 3 (187). С. 18–22.



- 12 Крутилин А. Н., Гуминский Ю. Ю., Русевич О. А., Кульбицкая Л. В. Повышение эффективности использования жидкостекольных смесей. Ч.4. Комбинированное упрочнение. *Литье и металлургия*. 2018. № 4. С. 38–44. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-38-44.
- 13 Способ изготовления литейных стержней из жидкостекольных смесей в нагреваемой оснастке «Термо-шок-CO2-процессом»: пат. 2630399 РФ. № 2015156533; заявл. 28.12.2015; опубл. 07.09.2017, Бюл. № 26. 9 с.
- 14 Жуковский С.С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм. Справочник. М.: Машиностроение, 2010. 256 с.
- 15 Способ изготовления литейных стержней и форм из жидкостекольных смесей: пат. 2094164 РФ. Заявл. 09.04.1996; опубл. 27.10.1997.
- 16 Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідко скляної суміші: пат. 122538 України. № а 201901350; заявл. 11.02.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22. 4 с.

Надійшла 22.07.2021

### References

- 1 Guminsky Yu. Yu., Rovin S. L. (2019). Environmentally friendly liquid glass binders modified with ultrafine material. *Casting and metallurgy*, no. 3, pp. 41–45. [in Russian]. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-3-41-45.
- 2 Shubina M. V., Kosareva E. A. (2012). The effectiveness of the use of liquid glass mixtures in the foundry. *Theory and technology of metallurgical production*, no. 11, pp. 108–117. [in Russian].
- 3 Krutilin A. N., Guminsky Yu. Yu. (2018). Improving the efficiency of using liquid glass mixtures. Part 2. Electrophysical methods of exposure. *Casting and metallurgy*, no. 2 (91), pp. 50–56. [in Russian].
- 4 Tkachenko S. S., Krivitskiy V. S., Emelyanov V. O., Martynov K. V. (2017). Possibility of using liquid glass molding and core sands in artistic casting. *Casting and metallurgy*, no. 2 (87), pp. 12–14. [in Russian].
- 5 Belabrov E. A., Karpenkova O. L., Belobrov L. E., Belobrov E. L., Belobrov K. E. (2017). Let us recall the forgotten technologies: the curing of rods and molds from a liquid glass mixture with an air-carbon dioxide mixture. *Casting of Ukraine*, no. 12, pp. 23–31. [in Russian].
- 6 Kukui D. M., Skvortsov V. A., Andrianov N. V. (2011). Foundry theory and technology. In 2 hours. Part 1. Molding materials and mixtures. Minsk: New knowledge; Moscow: INFRA-M, 384 p. [in Russian].
- 7 Davidenko A. K., Ivanov B. K., Okhrimenko G. P., Ponomarenko O. I. (2018). Self-hardening liquid glass molding-core mixtures for the manufacture of castings for power equipment. *Metal and casting of Ukraine*, no. 3–4, pp. 34–39. [in Russian].
- 8 Belobrov E. A., Karpenkova O. L., Belobrov L. E., Belobrov E. L. (2016). Let us recall the forgotten technologies: molds made of liquid glass mixtures, cured in air and with the help of portable bell-type gas or electric fan dryers. *Casting of Ukraine*, no. 2 (186), pp. 20–22. [in Russian].
- 9 Method of drying casting molds: AS 64501 USSR; No. 35415; declared 09/20/1940; publ. 04/30/1945. 1 p. [in Russian].
- 10 Belabrov E. A., Karpenkova O. L., Belobrov L. E., Belobrov K. E., Belobrov E. L. (2019). Let's remember the forgotten technologies: hardening of foundry molds with infrared and portable electric dryers. *Casting of Ukraine*, no. 4, pp. 24–27. [in Russian].
- 11 Belabrov E. A., Karpenkova O. L., Belobrov L. E., Belobrov E. L. (2016). Let us recall the forgotten technologies: curing of molds and cores from liquid glass mixtures with heat in chamber dryers. *Casting of Ukraine*, no. 3 (187), pp. 18–22. [in Russian].
- 12 Krutilin A. N., Guminsky Yu. Yu., Rksevich O. A., Kulbitskaya L. V. (2018). Improving the efficiency of using liquid glass mixtures. Part 4. Combined hardening. *Casting and metallurgy*, no. 4, pp. 38–44. DOI: 10.21122 / 1683-6065-2018-4-38-44. [in Russian].
- 13 Method of manufacturing casting cores from liquid glass mixtures in heated tooling "Thermo-shock-CO2-process": US Pat. 2630399 RF. No. 2015156533; declared 12/28/2015; publ. 09/07/2017, Bul. No. 26.9 p. [in Russian].

- 14 Zhukovsky S. S. (2010). Cold hardening binders and mixtures for cores and molds. Directory. M.: Mashinostroenie, 256 p. [in Russian].
- 15 Method of manufacturing casting cores and molds from liquid glass mixtures: US Pat. 2094164 RF. Appl. 04/09/1996; publ. 10/27/1997. [in Russian].
- 16 The way of making livery forms and haircuts from a very sklyanoy sum [A method of manufacturing molds and rods from a rare glass composite]: Pat. 122538 Ukraine. No. a 201901350; declared 02/11/2019; publ. 25.11.2020, Bul. No. 22.4 p. [in Russian].

Received 22.07.2021

**L. I. Solonenko**, PhD (Engin.), Assistant Professor; e-mail: solonenkoli14@gmail.com; ORCID 0000-0003-2092-8044

State University «Odesa Polytechnic» (Odesa, Ukraine)

### **SOME FEATURES OF THE STRUCTURING PROCESS OF A SAND-LIQUID-GLASS MIXTURE IN A STEAM-MICROWAVE MEDIUM**

*The article presents the results of studies of the influence of the mass of liquid glass spent on the cladding of quartz sand, the mass of water in water charges and their location in the working space of the model-rod equipment on the strength of the sand-liquid glass mixture structured by the method of steam-microwave hardening. The work used fresh water of technical purity, sodium water glass with a specific density of  $\rho_{LG} = 1.42 \text{ g/cm}^3$  and a silicate modulus  $M^{SiO_2} = 2.9$ , quartz sand with an average particle size of 0.23 mm and with a mass content of clay up to 0.1 %. Quartz sand was clad with water glass by mechanical mixing with water glass and air drying to a granular state. The structuring of the sand-liquid glass mixture was carried out by the method of steam-microwave curing in a microwave oven with a magnetron power of 700 W and a frequency of 2.45 GHz. It has been established that an increase in the strength of casting molds and cores made by the steam-microwave curing method is facilitated by both an increase in the mass of water glass used for cladding quartz sand and the mass of water in a water charge. In order to ensure the uniformity of strength throughout the body of casting molds and cores, the water charge should be located mainly in the lower and dead-end parts of the equipment used, taking into account the direction of movement of water vapor in relation to the places of its exit from the mixture during its structuring.*

**Keywords:** sand, liquid glass, mixture, water, shape, equipment, strength, steam-microwave hardening