

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

СОЛОНЕНКО ЛЮДМИЛА ІГОРІВНА

УДК 621.742.486

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ  
ПАРО-МІКРОХВИЛЬОВОГО СТРУКТУРУВАННЯ  
ПІЩАНО-РІДКОСКЛЯНИХ СУМІШЕЙ  
ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ**

Спеціальність 05.16.04 – Ливарне виробництво

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпро – 2023

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.  
Робота виконана в Українському державному університеті науки і технологій  
Міністерство освіти і науки України.

Науковий консультант: **Реп'ях Сергій Іванович**,  
доктор технічних наук, старший дослідник,  
професор кафедри ливарного виробництва  
Українського державного університету  
науки і технологій.

Офіційні опоненти: **Селівьорстов Вадим Юрійович**,  
доктор технічних наук, професор,  
декан факультету електромеханіки та  
електрометалургії Українського державного  
університету науки і технологій;

**Ямшинський Михайло Михайлович**,  
доктор технічних наук, доцент, завідувач  
кафедри ливарного виробництва чорних і  
кольорових металів Національного технічного  
університету України «Київський  
політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»;

**Іванов Валерій Григорович**,  
доктор технічних наук, доцент, завідувач  
кафедри машин і технологій ливарного  
виробництва Національного університету  
«Запорізька політехніка».

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р. о \_\_. \_\_ годині на засіданні  
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03 в Українському державному  
університеті науки і технологій за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2.

Із дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Українського державного  
університету науки і технологій за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03,  
д. т. н., проф.

Людмила КАМКІНА

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Близько 90% ливарних цехів західної Європи і більше 30% ливарних цехів України для виготовлення ливарних форм і стрижнів використовують одноразові піщано-смоляні суміші. За даними журналу Modern Casting при світовому випуску 100 млн. т лиття на рік близько 80 млн. т – це лиття зі сплавів на основі заліза і міді і близько 15 млн. т – лиття з алюмінієвих сплавів.

Така структура випуску лиття вимагає щорічного споживання синтетичних смол більше 1 млн. т і, відповідно, призводить до викиду в навколишнє середовище більше 1000 т на рік фенолу, формальдегіду, фурфурілового спирту і ряду інших канцерогенних і отруйних речовин.

З цієї причини в ряді країн Європи, виходячи зі стратегії «раннього залучення» щодо ініціатив Європейської Комісії «Європейський зелений курс», вже з 2000 року введені знижені норми на подібні викиди. В Європі цього досягають за рахунок використання в ливарних цехах відповідних систем уловлювання, переробки та утилізації газоподібних продуктів, що виділяються в результаті випаровування, деструкції та горіння синтетичних смол. В ливарних цехах України такі системи відсутні, а їх використання приведе до значного підвищення собівартості литва та втрати його конкурентної здатності – тобто, практично, до зупинки ливарних цехів.

Вирішенням даної проблеми є заміна синтетичних смол на рідке скло. На відміну від синтетичних смол рідке скло дешеве, має вітчизняне великотоннажне походження, хімічно і фізично твердіє, характеризується стабільністю властивостей у часі і прогнозованістю результатів використання, простотою зберігання і застосування, екологічною та санітарно-гігієнічною безпекою на всіх етапах його використання.

Тим не менше, на сьогодні використання натрієвого рідкого скла для ливарних форм та стрижнів обмежено через значні витрати енергії на їх теплову сушку і вибивання, регенерацію, підвищену гігроскопічність і обсіпальність, крихкість, схильність до утворення пригару тощо.

Питанням вивчення властивостей піщано-рідкоскляних сумішей присвячені роботи багатьох вчених і дослідників, в числі яких С.С. Жуковський, Д.М. Кукуй, А.М. Лясс, С.П. Дорошенко, П.А. Борсук, З.Я. Іткіс, Ю.П. Васін та ін. Незважаючи на це, на сьогодні немає комплексного вирішення низки зазначених вище проблем щодо використання рідкого скла у виробництві ливарних форм та стрижнів.

Комплексним вирішенням більшості зазначених проблем піщано-рідкоскляних сумішей може бути їх структурування паро-мікрохвильовим затвердінням (ПМЗ-процес). Проте, на сьогодні відсутні дані про кінетику та механізм їх структурування, про властивості таких сумішей та умови реалізації процесу, про вплив форм та стрижнів на якість виливків та ін.

Тому робота, яка присвячена вирішенню проблеми по розробці наукових і технологічних основ виготовлення піщано-рідкоскляних ливарних форм і стрижнів за ПМЗ-процесом замість дорогих, екологічно небезпечних, імпортованих сполучних матеріалів органічного походження, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконання дисертаційної роботи пов'язана з тематичними планами Українського державного університету науки і технологій та виконанням держбюджетної науково-дослідної роботи за темою: «Розробка інноваційної технології структурування екологічно безпечних формуально-стрижневих сумішей ливарного виробництва у паро-мікрохвильовому середовищі» (№ ДР 012U109531).

**Мета і завдання дисертаційної роботи.** Мета роботи – встановлення механізму, кінетики та закономірностей структурування в паро-мікрохвильовому середовищі сипучого кварцового піску, плакованого рідким склом, і результату його застосування на властивості ливарних форм та стрижнів, якість дрібних виливків загальномашинобудівного призначення.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання:

1. Встановити кінетику, визначити енергію активації і розробити опис механізму структурування кварцового піску плакованого силікатом натрію в середовищі водяної пари під дією мікрохвильового випромінювання.
2. Скласти матеріальний баланс та визначити допустимі температурні, часові і розмірно-масові межі структурування за ПМЗ-процесом.
3. Визначити раціональний рівень параметрів процесу структурування піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом та оптимізувати її склад.
4. Одержати функціональні залежності між рядом параметрів і властивостями піщано-рідкоскляної суміші, що структуровані за ПМЗ-процесом.
5. Дослідити та розробити опис механізму переносу рідкого скла та його дегідратації в капілярному каналі під дією мікрохвильового випромінювання.
6. Для шару плівкового типу з рідкого скла в умовах одностороннього контакту з повітрям встановити кінетику його карбонізації.
7. Встановити теплофізичні властивості піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих за ПМЗ-процесом, та можливість їх використання в якості теплоізоляційного матеріалу при виробництві виливків.
8. Визначити особливості нагрівання матеріалів та випаровування води в резонаторі мікрохвильової печі, що має номінальну потужність магнетрону від 700 до 1200 Вт та частоту випромінювання 2,45 ГГц.
9. Встановити особливості та визначити роботу вибивання з виливків стрижнів з піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані за ПМЗ-процесом.
10. Дослідити механізм руйнування піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих за ПМЗ-процесом, та вплив ливарних форм з цих сумішей на якість виливків.
11. Дослідити можливість склеювання структурованих піщано-рідкоскляних сумішей під дією мікрохвильового випромінювання.
12. Встановити можливість виготовлення об'ємно-замкнутих ливарних форм за ПМЗ-процесом за одноразовими моделями.
13. Встановити причини та розробити опис механізмів виникнення дефектів, притаманних стрижням з піщано-рідкоскляних сумішей, що структурують за ПМЗ-процесом.
14. Впровадити наукові та технологічні розробки досліджень в навчальний процес.

**Об'єкт дослідження** – процес виготовлення ливарних форм і стрижнів з піщано-рідкоскляних сумішей, які структуровані під дією мікрохвильового випромінювання в середовищі насиченої водяної пари.

**Предмет дослідження** – кінетика, механізм, властивості та закономірності структурування піщано-рідкоскляних сумішей під дією мікрохвильового випромінювання в середовищі насиченої водяної пари.

**Методи досліджень.** В роботі використані стандартні методи, методики і апаратура, загальноприйняті і оригінальні методики, що дозволили встановити об'єктивний взаємозв'язок між параметрами досліджуваних процесів. Теоретичні та експериментальні дослідження ґрунтуються на фундаментальних положеннях фізики, теплофізики, тепломасопереносу, механіки руйнування матеріалів.

Методи досліджень: термографування для визначення температури, зважування для визначення маси, металографічного та рентгенодифракційного аналізу для визначення макро- та мікроструктур сплавів і структури сумішей відповідно, симплекс-решітчастої оптимізації для оптимізації складу суміші, лінійного та хроно-гравиметричного вимірювання для визначення розмірів та визначення зміни маси суміші у часі відповідно, візуального спостереження для оцінювання якісних змін досліджувальних систем, системного підходу. Фізико-механічні властивості визначали за стандартними та оригінальними методиками у відповідності до діючих нормативно-технічних документів. Експериментальні дані обробляли методами математичної статистики, візуально-вимірювального контролю, зіставлення та аналізу.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

**1. Вперше для кварцового піску, плакованого рідким склом з силікатним модулем 2,8...3,0, встановлено кінетику, енергію активації, закономірності та розроблено опис механізму структурування в середовищі насиченої водяної пари під дією мікрохвильового випромінювання частотою 2,45 ГГц зі стоячою хвилею.**

Раніше такі дані не були відомі. Отримані результати розширюють уявлення про процеси масопереносу та структуроутворення сумішей і можуть бути використані при розробці технологій і обладнання, призначених для сушіння і структурування дрібнозернистих діелектричних матеріалів і їх сумішей під дією мікрохвильового випромінювання.

**2. Вперше встановлено кінетику та розроблено опис механізму карбонізації силікату натрію в шарі рідкого скла товщиною 20...30 мкм з вихідним вмістом води 17...20 % (за масою) і силікатним модулем 2,8...3,0 на повітрі з температурою 22...24 °С та відносною вологістю від 24 до 98 %.**

Раніше такі дані були не відомі. Це дозволяє розробляти рекомендації щодо зберігання та використання зернистих матеріалів плакованих рідким склом для виготовлення ливарних форм та стрижнів за ПМЗ-процесом в певних умовах виробництва литва.

**3. Вперше встановлено функціональні залежності між фізичними, розмірними та технологічними параметрами структурованих піщано-рідкоскляних сумішей з масовим вмістом рідкого скла 0,5...3,0 % з силікатним**

**модулем 2,8...3,0 за умов відсутності хімічних або фізичних перетворень силікату натрію в таких сумішах.**

Раніше такі функціональні залежності для піщано-рідкоскляних сумішей не були відомі. Використання отриманих залежностей дозволяє проводити прогнозування рівнів властивостей структурованих сумішей, спростити процес та скоротити час і витрати на оптимізацію їх складів.

**4. Вперше встановлено, що спінювання рідкого скла з силікатним модулем 2,8...3,0 в пласкому капілярі під дією мікрохвильового випромінювання йде за схемою ланцюгової реакції з елементарним циклом (самокапсулювання рідкого скла → руйнування капсули під тиском водяної пари, що виникає в капсулі → викид рідкого скла за межі капсули), який повторюється до повного випаровування води із капсул.**

Раніше такий механізм не був відомим. Отримані результати розширюють уявлення про процеси спінювання матеріалів і можуть бути використані при розробці нових способів та підходів у вирішенні проблеми оптимізації структурування зернистих матеріалів і, зокрема, для виробництва піщаних ливарних форм і стрижнів.

**5. Вперше (стосовно алюмінієво-магнієвого сплаву і сірого чавуну) встановлені інтегрального-ефективні значення теплофізичних властивостей піщано-рідкоскляних сумішей з 0,5...3,0 % (за масою, понад 100% піску) рідкого скла та уявною щільністю сумішей 1380...1758 кг/м<sup>3</sup>, які структуровані за ПМЗ-процесом.**

Раніше такі дані не були відомі. Використання отриманих даних дозволить підвищити точність аналітичних розрахунків часу і швидкості затвердіння виливків, прогнозу рівня і знака залишкових напружень в них, місць розташування усадкових дефектів, що скоротить час і всі види витрат на відпрацювання технології лиття і технологічності виливків.

**6. Вперше досліджено та розроблено опис механізму утворення дефектів (вимоїна, внутрішня тріщина), що притаманні виключно ливарним формам та стрижням, які виготовлені за ПМЗ-процесом.**

Раніше такі відомості не були відомі. Використання отриманих даних дозволить корегувати умови та технологічні параметри для виготовлення якісних ливарних форм та стрижнів, скоротити час і витрати на відпрацювання технології їх виготовлення.

**7. Вперше встановлено, що при ударно-вібраційному впливі характер руйнування піщано-рідкоскляних сумішей структурованих за ПМЗ-процесом має переважно адгезійний характер при тривалості паро-мікрохвильової обробки до 2 хв, змішаний характер – при тривалості 2...4 хв і переважно когезійний характер – при тривалості більше 4 хв.**

Раніше такі дані не були відомими. Отримані результати дозволили розширити уявлення про процеси, які супроводжують структурування та руйнування структурованих піщано-рідкоскляних сумішей та розробити рекомендації щодо термочасових умов виробництва піщаних ливарних форм та стрижнів за ПМЗ-процесом.

**8. Вперше встановлено, що відносна водостійкість піщано-рідкоскляної суміші, структурованої за ПМЗ-процесом, попередній нагрів якої не перевищував 600 °С, зменшується зі збільшенням температури води, а залежність водостійкості від тривалості ПМЗ-процесу в межах від 2 до 7 хв набуває інверсійного характеру з точкою інверсії 3,1...3,3 хв для маси рідкого скла в межах 0,5...2,5 %, використаного для плакування кварцового піску.**

Раніше такі закономірності не були відомі. Отримані результати дозволили рекомендувати спосіб видалення виливків з форми та стрижнів з виливків у воді, що дозволять суттєво скоротити енерговитрати та час на вибивання, і можуть бути корисними при розробці технологій та обладнання, призначених для видалення піщано-рідкоскляних стрижнів і залишків ливарних форм з виливків.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність роботи полягає у вирішенні важливої соціально-виробничої проблеми по заміні дорогих, екологічно небезпечних, органічних сполучних матеріалів імпортного походження на вітчизняне дешеве екологічно безпечне натрієве рідке скло для виготовлення ливарних форм та стрижнів дрібних виливків, за скороченим циклом їх виготовлення, зі збалансованим рівнем їх технологічних, теплофізичних і фізико-механічних властивостей. Одержані результати розширюють уявлення щодо зовнішніх впливів на формоутворення при виготовленні ливарних форм та стрижнів в ливарному виробництві.

На підставі одержаних результатів:

- розроблено загальні технологічні рекомендації по виробництву одноразових ливарних форм і стрижнів за ПМЗ-процесом;
- встановлено умови зберігання і підготовки кварцових пісків, плакованих силікатом натрію, та виробів з них;
- розроблено технологічні рекомендації зі склеювання рідким склом піщано-рідкоскляних ливарних форм і стрижнів в мікрохвильовому випромінюванні;
- розроблено технологічні рекомендації щодо попередження виникнення в ливарних формах та стрижнях внутрішніх тріщин та дефекту «вимоїна»;
- одержано функціональні залежності між обсіпальністю, газопроникністю, крихкістю, міцністю при статичному стисненні (розтягуванні) та роботою вибивання структурованих сумішей з виливків за умов відсутності хімічних або фізичних перетворень під дією теплоти, що виділяється при затвердінні та охолодженні залитого в них розплаву.

Результати роботи пройшли дослідно-промислові випробування, впровадження у виробництво та отримали позитивну оцінку на ПП «БУД-МАШ» (м. Житомир) при виготовленні дрібних сталевих та чавунних виливків (акт від 03.09.2020 р.), були впроваджені у виробництво ПрАТ «Одеський машинобудівний завод» (м. Одеса) при виготовленні дрібних чавунних виливків (акт від 01.07.2020 р.) та на ТОВ «Промислова компанія «Перспектива» (м. Дніпро) при виготовленні дрібних виливків з чавуну, сталі та бронзи (акт від 27.09.2019 р.). Отримані в роботі наукові та технологічні результати, розроблені методики, описи механізмів впроваджені в навчальний процес Національної металургійної академії України і використовуються при виконанні випускних кваліфікаційних

робіт бакалаврів та магістрів (акт від 28.11.2021 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові результати, що отримані в дисертації, базуються на дослідженнях, проведених особисто здобувачем. Публікації відображають результати досліджень, виконаних здобувачем. В дисертації не використані ідеї співробітників, які сприяли виконанню роботи. Здобувач самостійно розробив технологічні та теоретичні основи структурування піщано-рідкоскляних сумішей в паро-мікрохвильовому середовищі, оригінальні методики та опис механізмів досліджуваних процесів, виконав експериментальні та теоретичні дослідження, аналіз, узагальнення та обробку отриманих даних.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві (в порядку, представленому у списку публікацій здобувача): розробка методик, проведення досліджень, обробка отриманих результатів [7, 19, 23, 26, 28, 34, 46, 49, 50, 51]; проведення досліджень, обробка отриманих результатів, щодо виникнення дефектів форм та стрижнів, виготовлених за ПМЗ-процесом [21]; оптимізація складу досліджуваних сумішей, аналіз отриманих результатів [6, 20]; проведення експериментів, визначення фізичних та теплофізичних властивостей сумішей [1, 5, 11, 12, 16, 17, 22]; організація, планування та проведення експериментів, обробка отриманих результатів [8, 18, 43, 45, 52, 53]; теоретичне обґрунтування, розробка функціональних залежностей [14, 15, 38, 39, 40]; розробка методик, підготовка та експериментальне встановлення кінетики процесу, обробка отриманих результатів [4, 10]; розробка опису механізму процесу [2, 3, 48, 56]; розробка матеріального балансу, аналіз, побудова номограм [44, 47]; проведення промислових іспитів та дослідження їх результатів [24, 27, 32]; визначення шляхів підвищення екологічної та санітарно-гігієнічної безпеки ливарного виробництва [13]; розробка, обґрунтування та основні ознаки технічних рішень, захищених охоронними документами [33, 34, 35, 36]; узагальнення та аналіз літературних даних та наукове обґрунтування завдання [9, 37, 41, 42].

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали роботи були викладені, доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях: The 2<sup>nd</sup> International scientific and practical conference «Topical issues of the development of modern science» (Sofia, 2019); XI Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (Київ, 2019); XV Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2019» (Запоріжжя, 2019); The 12<sup>th</sup> International conference «Science and society» (Canada, 2019); The 1<sup>st</sup> International scientific and practical conference «Perspectives of world science and education» (Osaka, 2019); The 1<sup>st</sup> International scientific and practical conference «Priority directions of science development» (Lviv, 2019); International scientific conference «Advance of science» (Czech Republic, 2019); XII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (Київ, 2020); XVI Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2020» (Запоріжжя, 2020); XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021» (Київ, 2021); XVII Міжнародна науково-практична конференція



«Литво. Металургія. 2021» (Запоріжжя, 2021); 81 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, 2021); The 3<sup>rd</sup> International scientific and practical conference «Modern science: innovations and prospects» (Stockholm, 2021); XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2022» (Харків-Київ, 2022); XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022» (Київ, 2022).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано в 60 наукових роботах, в тому числі: у 3 патентах України на винахід; у 1 патенту України на корисну модель; у 24 статтях в журналах зі спеціального переліку фахових видань МОН України; 8 – у виданнях, які входять до міжнародної наукометричної бази Scopus та Web of Science; у 24 матеріалах міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація викладена на 450 сторінках, складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 439 найменувань, 14 додатків. Робота містить 174 рисунків, 58 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано її мету та завдання досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення, а також наведено основні дані щодо апробації отриманих результатів, публікацій, відомості про структуру та загальну характеристику дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз напрямків підвищення екологічної та санітарно-гігієнічної безпеки використання формувальних та стрижневих сумішей в ливарному виробництві. На підставі результатів цього аналізу з урахуванням особливостей сучасних сполучних матеріалів було визначено, що рідке скло є найбільш перспективним сполучним матеріалом для виготовлення ливарних форм та стрижнів. Проаналізовано склад та властивості сучасних формувальних та стрижневих сумішей, визначені основні допустимі межі їх технологічних та фізико-механічних властивостей. Розглянуто сучасні способи структурування, модифікування рідкого скла та технологічні добавки до піщано-рідкоскляних сумішей, особливості та результати мікрохвильової сушки свіжовиготовлених піщано-рідкоскляних сумішей, їх властивості, механізм спінювання рідкого скла під час його сушіння від зовнішнього джерела тепла. Наведені дані щодо теплофізичних властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані після механічного ущільнення тепловим сушінням, кінетики їх структурування, дефектів ливарних форм та стрижнів з піщано-рідкоскляних сумішей та виливків, які виготовляють в таких формах. З розглянутого були визначені основні недоліки та проблеми піщано-рідкоскляних форм та стрижнів, які структуровані загальноприйнятими способами, визначено рівні їх основних властивостей.

На підставі проведеного аналізу сучасного стану питання показана актуаль-

ність проблеми, що вирішується в дисертаційній роботі, визначені мета та завдання досліджень, які необхідно вирішити для її досягнення.

**У другому розділі** наведено відомості про матеріали, методи та методики (стандартні, загальноприйняті, оригінальні), які використано в дослідженнях.

Основними матеріалами, які були використані в роботі, є: кар'єрний кварцовий пісок марки  $1K_2O_2O_2$ ,  $2K_1O_3O16$ ,  $1K_3O_3O2$ ; вода; натрієве рідке скло з силікатним модулем 2,8...3,0.

Обробку матеріалів мікрохвильовим випромінюванням проводили в мікрохвильових печах з частотою мікрохвильового випромінювання 2,45 ГГц та з номінальною потужністю магнетрону 700...1200 Вт.

Змішування і помел сумішей проводили в каткових бігунах мод. 15111. Розсів піску проводили на приладі мод. 029. Ущільнення пісків та сумішей проводили на вібраційному столі мод. М1 з частотою коливань 50 Гц і амплітудою 0,8...1,0 мм. Температуру виміряли та фіксували на електронному потенціометрі мод. АТ4208 в комплекті з контактною хромель-алюмелевою, хромель-капелевою або вольфрам-молібденовою термопарою. Структуру матеріалів та сумішей досліджували на бінокулярному оптичному мікроскопі мод. МБС-10 та на растровому електронному мікроскопі мод. РЕМ-106І. Структуру сплавів досліджували на оптичному мікроскопі НЕОРНОТ 21. Масу визначали на електронних вагах мод. PocketScale/1724 з точністю 0,01 г та Notebookseries VS-1108-20, ВТА-60/6-73-AL з точністю 0,1 г. Рентгено-дифракційні спектри рідкого скла отримано на рентгенодифрактометрі ДРОН-3.0 з  $Co-K_{\alpha}$ -випромінюванням з використанням програми X-REY та їх розшифруванням по базах даних PCPDFWIN. Руйнування зразків, структурованих сумішей, проводили на лабораторному копрі мод. 5033А, міцність на стиск визначали на приладі мод. LRu-2e, обсіпальність – на приладі мод. 04812, газопроникність – на приладі мод. 04315. Стрілу вигину фіксували за показниками індикатору годинникового типу з точністю 0,01 мм за триточковою схемою навантаження зразків. Відносну вологість і температуру повітря вимірювали за допомогою електронного термометра-гігрометра ТА-318. Параметри шорсткості литих поверхонь визначали на профілографі в комплекті з інформаційно-обчислювальним комплексом мод. 170622.

Оптимізацію проводили за результатами реалізації симплекс-решітчастого плану Г. Шеффе шляхом накладення масштабованих зображень симплекс-решіток або їх критичних ізоліній. Теплофізичні властивості піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані за ПМЗ-процесом, визначали за методом Г.А. Анісовича.

За оригінальними методиками визначали відносну діелектричну проникність речовин, кінетику карбонізації рідкого скла у шарі, вплив технологічних домішок на карбонізацію рідкого скла у шарі, вплив кількості рідкого скла в піщано-рідкоскляній суміші на її водостійкість, механізм спінювання рідкого скла в капілярі щілинного типу під дією мікрохвильового випромінювання, кінетику структурування плакованого піску за ПМЗ-процесом, тощо. Обробку експериментальних даних проводили із застосуванням загальноприйнятих та статистичних методів.

**У третьому розділі**, виходячи з необхідності забезпечення однорідності та певної швидкості нагрівання матеріалів ( $w$ ) мікрохвильовим випромінюванням,

встановили відносну діелектричну проникність ( $\epsilon$ ) та її зв'язок з величиною  $w$  деяких вогнетривких матеріалів українського походження (див. табл. 1), які можуть бути використані для виготовлення ливарних форм та стрижнів за ПМЗ-процесом.

Таблиця 1 – Значення  $\epsilon$  для досліджуваних матеріалів

Матеріал	$\epsilon$	Матеріал	$\epsilon$
Силікат-брила (содова)	17,2	Концентрат цирконовий	3,2
Рутил	6,9	Пісок кварцовий	4,6
Електрокорунд нормальний	7,6	Концентрат дистен-сіліманітовий	4,3
Шамот	4,9	$\beta$ -гіпс (Г-4)	4,5
Кварцит рожевий	3,3	$\alpha$ -гіпс (Г-22)	2,4

Встановлено, що в мікрохвильових печах з номінальною потужністю магнетрону 700 Вт величина  $w$  для матеріалів з  $\epsilon \leq 10$  прямо пропорційна величині  $\epsilon$  і може бути розрахована за формулою ( $^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ ):

$$w = 7,47 \cdot (\epsilon - 1). \quad (1)$$

При цьому, величина  $\epsilon$  залежить виключно від хімічного складу матеріалу і для зернистих матеріалів, що містять за масою  $\text{SiO}_2$  в межах від 0 до 99,7%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,07...95,0%,  $\text{ZrO}_2$  – 0...65% ,  $\text{TiO}_2$  – 0...97%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,03...6,1% і сумарного вмісту  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}$  – від 0 до 0,6% (для матеріалів з  $\epsilon \leq 10$ ) з точністю, прийнятною для інженерних розрахунків, може бути розрахована за формулою:

$$\epsilon = 0,0307 \cdot \text{ZrO}_2 + 0,0326 \cdot \text{SiO}_2 + 0,0483 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,0665 \cdot \text{TiO}_2 + 0,2394 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 4,6262 \cdot (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}), \quad (2)$$

де  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та ін. – масовий вміст речовин, %, відповідно.

Особливістю мікрохвильових печей зі стоячею хвилею є змінно-послідовний характер розподілу у просторі його резонатору зон областей вузлів та пучностей. Такий характер розподілу потужності мікрохвильового випромінювання призводить до появи в резонаторі зон, в яких не відбувається нагрівання будь-якого матеріалу. Крім того, хвилям мікрохвильового випромінювання також притаманний процес загасання, що позначається на зниженні потужності мікрохвильового випромінювання не тільки з віддаленням від виходу хвилеводу в резонатор, але і зі зміною частоти обертання столу в резонаторі, розмірів наважок (в плані на обертовому столі), положення наважок на обертовому столі, напрямку обертання столу для кожної наважки тощо. Про це, зокрема, свідчать залежності на рис. 1 та на рис. 2.

Залежність коефіцієнта загасання ( $\chi$ ) в центральній області резонатора від номінальної потужності магнетрона мікрохвильової печі та від номінальної потужності її магнетрона і віддалення від вісі обертового столу представлені на рис. 2.

Відповідно ходу залежностей на рис. 2, реальна потужність мікрохвильового випромінювання в центральній області мікрохвильової печі становить  $\chi = 0,40 \dots 0,72$  (див. рис. 2,а) та зменшується до  $\chi = 0,29 \dots 0,36$  зі зменшенням номінальної потужності магнетрону печі та наближенні до краю обертового столу (див. рис. 2,б).

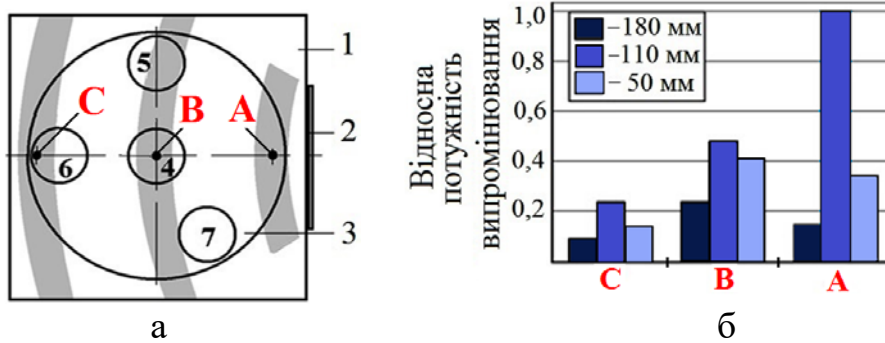


Рис. 1 – Схема розташування наважок на обертовому столі (а), гістограма відносної потужності в точках А, В, С на різних рівнях від дна резонатора (б): 1 – резонатор; 2 – вихід хвильоводу в резонатор; 3 – обертовий стіл; 4...7 – наважки

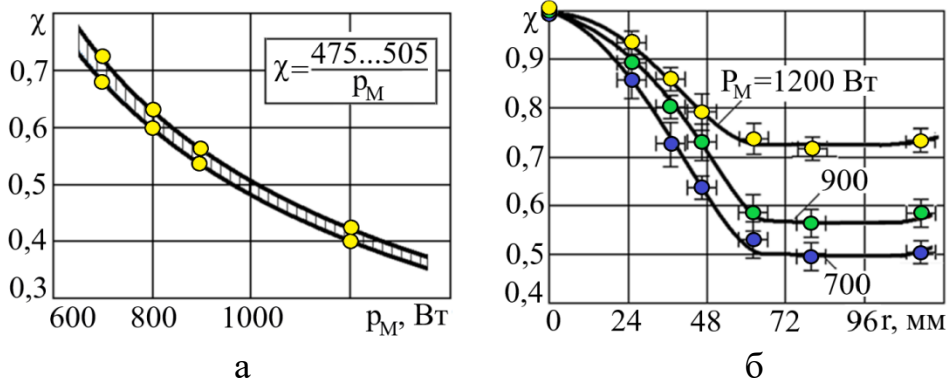


Рис. 2 – Залежність  $\chi$  в центральній області резонатора від номінальної потужності магнетрона мікрохвильової печі (а) та від номінальної потужності її магнетрона і віддалення від вісі обертового столу (б)

До числа особливостей випаровування води з наважок під дією мікрохвильового випромінювання є їх взаємний вплив на час випаровування, про що свідчать залежності характеру зміни маси наважок води різної початкової маси, розталованих на одному радіусі обертового столу, від тривалості їх нагрівання в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрона 900 Вт, що представлені на рис. 3.

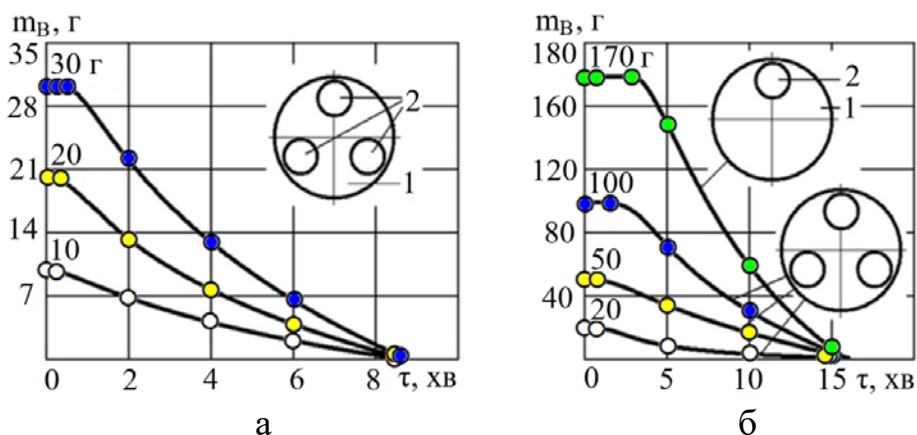
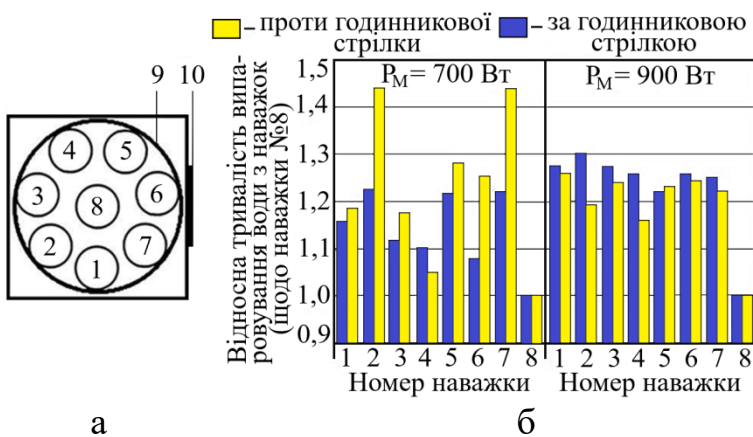


Рис. 3 – Залежність маси води в наважках від тривалості їх нагрівання в мікрохвильовій печі при загальній сумарній масі води в трьох наважках 60 г (а), при початковій масі води в одній наважці 170 г і тієї ж сумарної маси води в трьох наважках масою 20, 50 і 100 г (б): 1 – обертовий стіл; 2 – наважка води

Аналіз ходу залежностей на рис. 3 свідчить про те, що незалежно від початкової маси води і числа наважок, вода з кожної наважки випарується практично за той же час, за який би вода випарувалася з однієї наважки масою, що дорівнює сумі всіх наважок. Тобто, за весь час випаровування незалежно від початкової маси води в наважці швидкість її випаровування буде змінюватися пропорційно співвідношенню її вихідної маси до вихідної маси всіх наважок, які одночасно нагрівають.

При цьому, тривалість випаровування води під дією мікрохвильового випромінювання зростає зі збільшенням вихідної маси води, яку нагрівають, і також залежить від початкового положення наважки на обертовому столі та від напрямку його обертання в печі, що впливає з аналізу гістограм на рис. 4.

Залежність тривалості випаровування води з наважок від напрямку обертання пояснюється впливом води в наважках на розподіл вузлів та пучностей в резонаторі, що витікає з аналізу вигляду хвиль випромінювання (див. рис. 5) при нагріванні на обертовому столі чотирьох наважок води по 100 г кожна.



а

б

Рис. 4 – Схема розташування наважок води на обертовому столі (а), гістограма відносної тривалості нагрівання і випаровування води з наважок (б): 1...8 – наважка води; 9 – обертовий стіл; 10 – вихід хвилеводу в резонатор

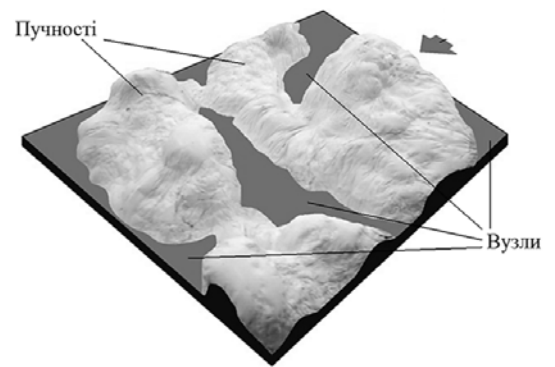


Рис. 5 – Вигляд хвиль випромінювання при нагріванні на обертовому столі чотирьох наважок води по 100 г кожна

За результатами виконаних досліджень витікає, що теоретичні та експериментальні дані щодо тривалості випаровування води в резонаторі мікрохвильової печі не можуть збігатися без урахування втрат потужності, що витрачається на нагрівання, як конструктивних елементів резонатора, так і наважок води, їх ємностей та зміни характеру розподілу зон пучностей та вузлів.

Таким чином, в результаті математичної обробки експериментальних даних та використання залежності Джоуля-Ленца, узагальнену формулу для розрахунку тривалості нагрівання та випаровування води з наважок при їх обертанні в області стоячих хвиль мікрохвильового випромінювання та наявності в резонаторі інших матеріалів запишемо у вигляді:

$$\tau = F \frac{(c_A \cdot \Delta t_A + L_A)}{P_M} + \frac{\sum_0^n Q_n}{F_h \cdot P_M}, \quad (3)$$

$$Q_n = f_n \cdot m_n, \quad f_n = c_n \cdot (t_1 - t_n),$$

$$\begin{cases} F = 2,812 \cdot (m_B - 3m_B^2), & n = 0; r \leq 0,03 \text{ м}; \\ F = 25,7946 \cdot (m_B - 25,3m_B^2), & n = 0; r > 0,03 \text{ м}; \\ F = 20,4 \cdot m_{Ц}^{0,885} \cdot m_K^{0,265}, & n \geq 1; (r) \leq 0,03 \text{ м}; \\ F = 0,18 \cdot (m_{Ц}^{0,412} + 17,22m_K^{0,824}), & n \geq 1; (r) > 0,03 \text{ м}, \end{cases}$$

де  $c_A, c_n$  – теплоємність води та n-го матеріалу, відповідно;  $\Delta t_A$  – температурний інтервал підвищення температури води;  $L_A$  – теплота випаровування води;  $m_B, m_{Ц}, m_K, m_n$  – маса води однієї наважки в резонаторі, маса води наважки в центрі резонатору, маса води наважки на віддаленні більше 30 мм від вісі обертового столу, маса n-го матеріалу в резонаторі відповідно;  $P_M$  – реальна потужність магнетрону;  $n$  – число матеріалів в резонаторі крім води;  $t_1, t_n$  – вихідна та кінцева температура n-го матеріалу відповідно;  $r, (r)$  – відповідно, радіус віддалення геометричного центру (у плані) одиночної та парної наважки води від вісі обертання столу резонатору.

Таким чином, за результатами виконаних досліджень нагрівання та випаровування води з наважок в мікрохвильовій печі, в тому числі у присутності матеріалів різної природи та з урахуванням викладених вище результатів, встановлено, що:

- мікрохвильова обробка тіл в області стоячих хвиль з використанням резонатору з обертовим столом призводить до безперервного «дрейфу» зон пучностей, характер якого залежить від маси, положення на обертовому столі, розмірів і діелектричної проникності тіла тощо;

- збільшення номінальної потужності магнетрона мікрохвильової печі від 700 до 1200 Вт практично не впливає на середню тривалість нагрівання і випаровування води з наважок, але підвищує рівномірність їх нагрівання;

- з числа досліджених матеріалів для виробництва ливарних форм та стрижнів за ПМЗ-процесом найбільш доцільним є кварцовий пісок, для виготовлення оснащення, яке можливо використовувати в ПМЗ-процесі, –  $\alpha$ -гіпс або суміші на його основі;

- для структурування піщано-рідкоскляних сумішей у мікрохвильовому випромінюванні за ПМЗ-процесом доцільно використовувати наважки води, в якості водяних зарядів точкового типу, масою до 3 г.

**У четвертому розділі** досліджується процес структурування піщано-рідкоскляних сумішей за способом ПМЗ. Відповідно до пат. UA 122538 спосіб ПМЗ полягає в тому, що сухий пісок, плакований водорозчинним сполучним матеріалом, засипають і ущільнюють в модельно-стрижневому оснащенні, в якому попередньо розміщують один або більше водяних зарядів, що являють собою дозовану за масою кількість води, наприклад, в пінополіуретані, віброущільнюють плакований пісок і обробляють мікрохвильовим випромінюванням. При цьому водяні заряди розміщують в робочому просторі модельно-стрижневого оснащення або у стрижневому ящику відповідно до однієї із схем на рис. 6.

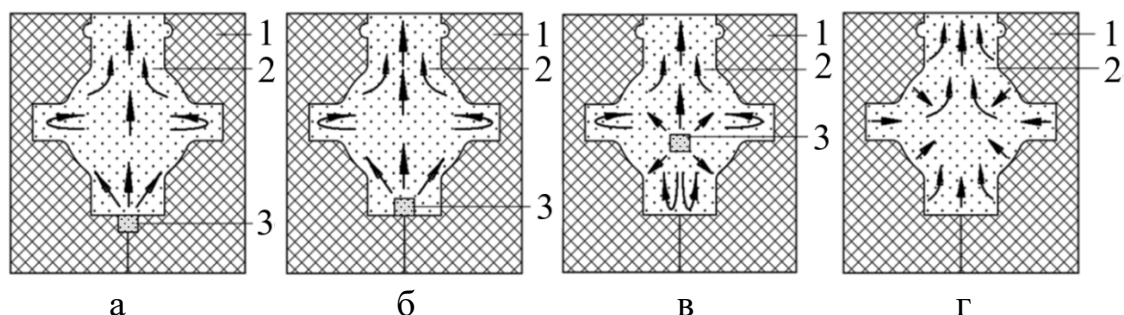


Рис. 6 – Схема внутрішнього розміщення водяних зарядів поза межами робочої порожнини стрижневого ящика (а), в робочій порожнині стрижневого ящика (б), в середині стрижня (в), на поверхні робочої порожнини стрижневого ящика (г) з виходом пари зі стрижневого ящика через контактуючу з ним поверхню суміші:  
1 – стрижневий ящик; 2 – стрижнева суміш; 3 – водяний заряд

У ПМЗ-процесі ущільнення сипучого плакованого піску проходить під час його вібрації. Сипучість піску з вмістом води до 0,2% (за масою) не залежить від фракції (розмірів піщинок) і їх поєднань в суміші, а уявна щільність вібраційно ущільненого піску (чистого, плакованого рідким склом) адитивна пайовому масовому вмісту в ньому середнього розміру його зерен і може бути розрахована за формулою, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho^* = 1927 \cdot m_{016} + 1724 \cdot m_{02} + 1537 \cdot m_{0315} + 1345 \cdot m_{04} + 1063 \cdot m_{063} \pm 7, \quad (4)$$

де  $m_{016} \dots m_{063}$  – відносна маса піску за фракцією в суміші, що вказана в індексі.

Важливими факторами, які впливають на властивості структурованих піщано-рідкоскляних сумішей за ПМЗ-процесом – є тривалість випаровування води з водяного заряду та місце його розташування в оснащенні. В свою чергу швидкість випаровування води з водяного заряду залежить від її виду, про що свідчать залежності на рис. 7.

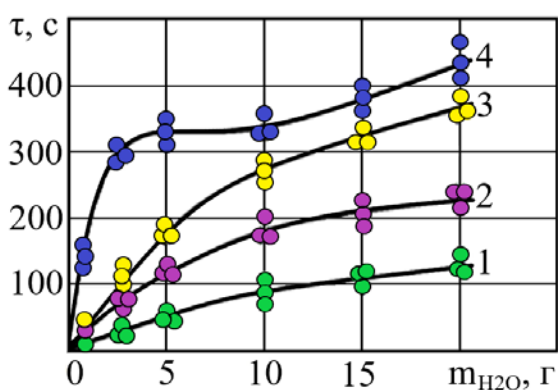


Рис. 7 – Залежності тривалості випаровування води в мікрохвильовому випромінюванні від її маси: 1 – вода з початковою температурою +17 °С; 2 – вода в 100 г піску з початковою температурою +17 °С; 3 – замерзла вода в 100 г піску з початковою температурою –17 °С; 4 – вода в поліуретановій губці з початковою температурою +17 °С

Вплив напрямків виходу водяної пари при розташуванні водяного заряду з масою води 2 г в середині стакана на міцність на стиск структурованої суміші з 2,5 % рідкого скла по шарах зразка відповідно, представлено на рис. 8

При цьому вже при використанні 0,5 % рідкого скла у піщано-рідкоскляних сумішах, які структуровані за ПМЗ-процесом, суміш має міцність на стиск аналогічну, як і піщано-рідкоскляна суміш з 2 % рідкого скла, що структуровані



іншими способами, найбільш поширеними в ливарних цехах, про що свідчать залежності на рис. 9. Така закономірність пояснюється як адресним розташуванням рідкого скла в суміші (див рис. 10), що структурована за ПМЗ-процесом, так і низьким вмістом в ній гідратної води.

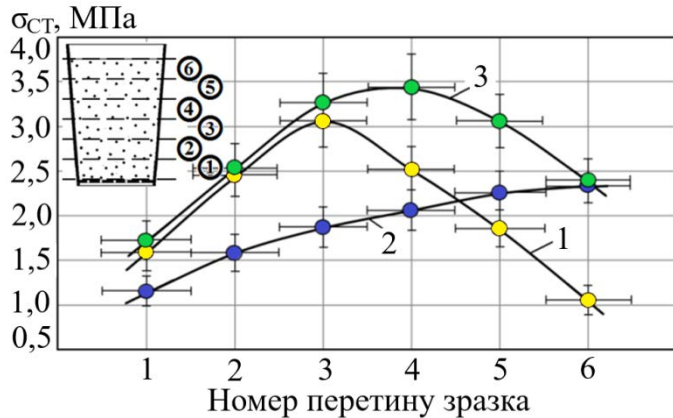


Рис. 9 – Залежність міцності на стиск піщано-рідкоскляних сумішей від способу їх структурування та маси в них рідкого скла: 1 – CO<sub>2</sub>-процес (через 1 годину після продування); 2 – затверджувач – пилоподібний ферохромовий шлак (через 24 год після ущільнення суміші); 3 – сушка при 210...230 °С протягом 2 год; 4 – ПМЗ-процес (через 5-10 хв після закінчення структурування)

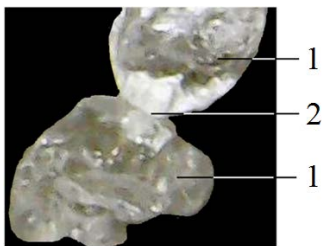


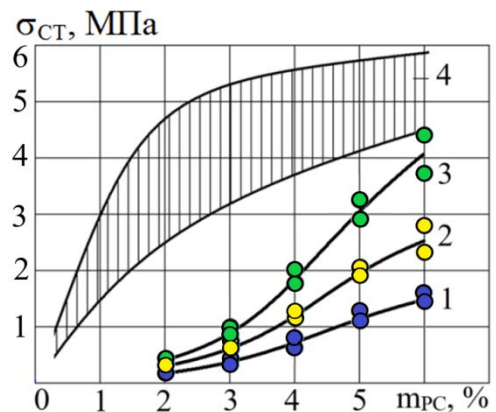
Рис. 10 – Вигляд манжети (2) з силікату натрію між піщинками кварцового піску (1) в піщано-рідкоскляній суміші яка структурована за ПМЗ-процесом

З метою забезпечення рівномірності міцності по тілу форм та стрижнів, водяні заряди слід розташовувати переважно в нижніх і тупикових частинах оснащення з урахуванням напрямку руху водяної пари по відношенню до місць її виходу з суміші при її структуруванні.

За результатами візуальної оцінки структури рідкого скла, затверділого в пласкому капілярі щільного типу, розроблено опис механізму його переносу. Встановлено, що масоперенос рідкого скла і під дією мікрохвильового випромінювання характеризується багатоетапністю і проходить за принципом ланцюгової реакції, що в загальному вигляді може бути представлена за схемою на рис. 11.

Відповідно до рис. 11,а, на початку нагрівання на вільній поверхні краплі рідкого скла 1, в результаті випаровування вільної води, з'являється тонка в'язкопластична суцільна плівка з частково дегідратованого рідкого скла (піропластичного силікату натрію) 2 (див. рис. 11,б). При цьому залишок в краплі м'якого рідкого скла виявляється замкнутим (капсульованим) всередині цієї оболонки.

Рис. 8 – Пошарова нумерація зразків та залежність міцності зразків по перетинам шарів при розташуванні водяного заряду посередині стакану, з виходом пари у верхній частині стакану (1), у нижній частині стакану (2) і в обох напрямках (3)





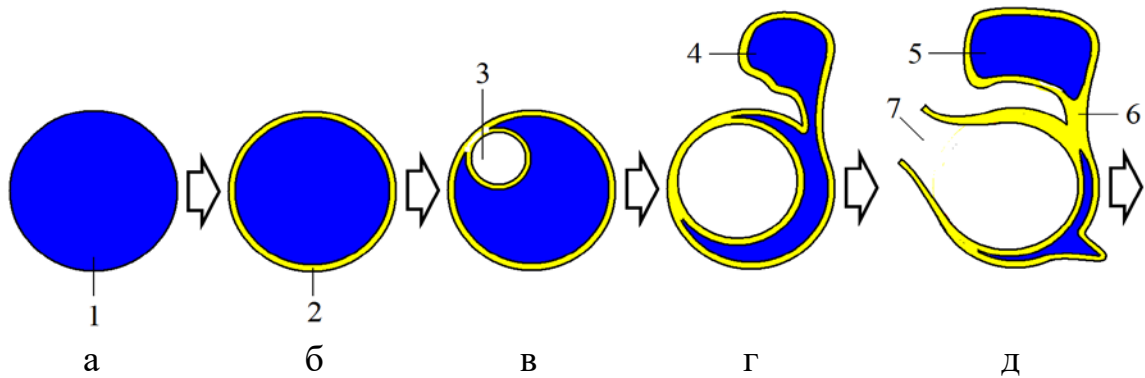
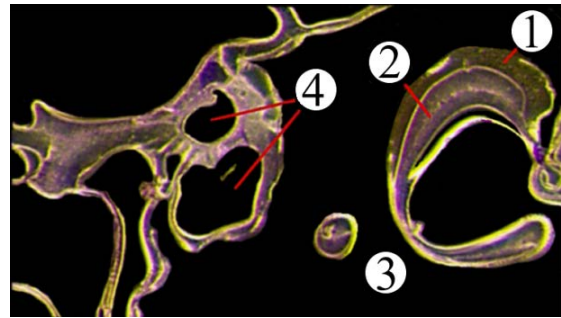


Рис. 11 – Вихідна форма краплі рідкого скла в плоскому капілярі щілинного типу (а), в початковий момент впливу мікрохвильового випромінювання (б), в момент виникнення у краплі парової бульбашки (в), в момент виникнення новоутворення з рідкого скла (г), в момент завершення формування вторинної капсули рідкого скла (д): 1 – крапля рідкого скла; 2 – оболонка з піропластичного силікату натрію (первинна капсула рідкого скла); 3 – парова бульбашка; 4 – новоутворення з рідкого скла; 5 – вторинна капсула рідкого скла; 6 – міжкапсульний канал; 7 – паровий канал

На другому етапі нагріву (див. рис. 11,в) після досягнення температури кипіння води в краплі м'якого рідкого скла виникає газова бульбашка 3. На третьому етапі (див. рис. 11,г) нагрівання призводить до збільшення маси води, що випарувалася в первинній капсулі рідкого скла, і, відповідно, підвищення тиску як в паровій бульбашці, так і в капсулі. У момент часу, коли швидкість підвищення парового тиску в капсулі перевищить граничну деформаційну можливість її оболонки, відбувається розрив оболонки і витіснення за її межі м'якого рідкого скла. В результаті такого викиду з'являється новоутворення рідкого скла 4. На четвертому етапі нагріву (див. рис. 11,д) поверхня витиснутого із первинної капсули струменя рідкого скла покривається аналогічною оболонкою, формується вторинна капсула, а міжкапсульний канал 6 між старою і новою капсулою 5 твердне, закінчуючи процес нового капсулювання витісненого рідкого скла. Згодом в новій капсулі, як і в попередній, виникає парова бульбашка 3, підвищується паровий тиск в капсулі і м'яке рідке скло струменями викидається за межі капсули, формуючи нові капсули і міжкапсульні 6 і парові 7 канали (див. рис. 11,д). Як результат рідке скло наприкінці завершення процесу сушіння набуває вигляду, що представлено на рис. 12.



а



б

Рис. 12 – Вид на темному полі (тлі) затверділого в плоскому капілярі щілинного типу рідкого скла (вид в плані) при збільшенні  $\times 14$  (а) і  $\times 100$  (б): 1 – зневоднений силікат натрію; 2 – незатверділе рідке скло; 3 – паровий канал; 4 – парова бульбашка

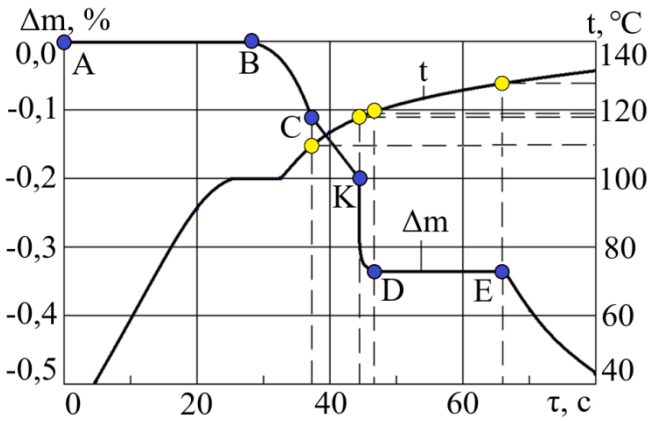


Рис. 13 – Відносна зміна маси і температури наважки з кварцового піску, плакованого 3 % рідкого скла (вміст гідратної води <0,1 %) та водяного заряду, розташованим в доній частині наважки, від тривалості її обробки мікрохвильовим випромінюванням

його спінювання, яке виникає за рахунок інтенсивного випаровування з нього води з величиною енергії активації  $E_{\Pi} = 23,9$  кДж/моль;

- при 119...128 °С перенос рідкого скла відбувається шляхом його в'язкої течії з величиною енергії активації  $E_{\Pi} = 49,3$  кДж/моль.

Максимально допустимою температурою нагріву піщано-рідкоскляної суміші під час її структурування за ПМЗ-процесом слід вважати 125 °С, оскільки перевищення зазначеної температури призводить до виділення гідратної води в суміші у вигляді пари, яка може конденсуватися на робочій поверхні модельно-стрижневого оснащення і приводити до погіршення якості поверхні виготовлених форм та стрижнів.

За результатами складання матеріального балансу встановлено, що наявність рідкого скла в кварцовому піску та його низька уявна щільність суттєво знижують масу піщано-рідкоскляної суміші, яку можливо обробити фіксованою кількістю насиченої водяної пари, по відношенню до чистого кварцового піску, що пов'язано з процесами гідратації-дегідратації рідкого скла, його кількістю, відносною пористістю суміші та часом її нагрівання мікрохвильовим випромінюванням.

Для розрахунку маси піщано-рідкоскляної суміші, яку можливо структурувати за ПМЗ-процесом 1 г води у водяному заряді, можна розрахувати за формулою, г:

$$m_c = \frac{530}{m_{pc} + 0,125} \cdot \sqrt{\tau}, \quad (5)$$

де  $m_{pc}$  – маса рідкого скла, що використане для плакування піску, % (понад 100 % піску);  $\tau$  – час обробки мікрохвильовим випромінюванням, хв.

Об'єм структурованої піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом розраховували за формулою, см<sup>3</sup>:

Результат досліджень кінетики сушки плакованого кварцового піску під час його структурування за ПМЗ-процесом представлено на рис. 13.

Встановлено, що при ПМЗ-процесі виділення води з структурованої суміші проходить в три етапи. Перший етап реалізується при температурі суміші ~100 °С, другий етап – при 109...118 °С, третій етап – при 119...128 °С. При цьому перенос рідкого скла в піщано-рідкоскляній суміші, яку структурують за ПМЗ-процесом, проходить за двома механізмами:

- при 109...118 °С перенос рідкого скла в капілярних каналах піщано-рідкоскляної суміші відбувається шляхом

$$V = \frac{200}{\rho_K \cdot \{0,01 \cdot [107,5 \cdot \ln(\rho_{PC}) + 1] \cdot m_{PC}\}^{0,9}} \cdot \sqrt{\tau}, \quad (6)$$

де  $\rho_K$  – уявна щільність кварцового піску, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{PC}$  – питома щільність рідкого скла, використаного для плакування кварцового піску, г/см<sup>3</sup>.

При цьому рекомендовано використовувати кварцовий пісок, плакований 0,5...2,5 % рідким склом, що при масі водяного заряду 1 г дозволить, відповідно, структурувати від 2400 до 500 г суміші протягом 8...4 хв.

У п'ятому розділі досліджено властивості рідкоскляних сумішей, що структуровані за ПМЗ-процесом, та проведено оптимізацію параметрів їх структурування.

Газотвірну здатність рідкоскляних сумішей розраховували за формулою:

$$\Gamma = 1670 \cdot m_B, \quad (7)$$

$$m_B = 0,385 - 0,2549 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0,7046 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,9194 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + 0,4583 \cdot 10^{-11} \cdot t^4, \quad (8)$$

де  $m_B$  – маса води в 1 г структурованої суміші, г;  $t$  – температура нагріву рідкого скла, °С.

Встановлено, що для зниження газотвірної здатності форм та стрижнів, що виготовляють за ПМЗ-процесом доцільно використовувати кварцовий пісок, плакований менш ніж 2 % рідкого скла, який після сушки на повітрі до постійної маси, слід обробити мікрохвильовим випромінюванням протягом 5 хв і структурувати у відповідному модельно-стрижневому оснащенні мікрохвильовим випромінюванням протягом не менше 5 хв. У цих випадках, незалежно від положення структурованої суміші щодо вісі обертового столу в резонаторі, газотвірна здатність форм та стрижнів буде перебувати в межах від 3,3 до 5 см<sup>3</sup>/г.

Залежність роботи вибивання піщано-рідкоскляної суміші, структурованої за ПМЗ-процесом з різним вмістом рідкого скла, від температури її попереднього нагріву надано на рис. 14. Залежність відносної тривалості руйнування піщано-рідкоскляної сумішей в киплячій воді (водостійкість), структурованих за ПМЗ-процесом, від температури їх попереднього нагріву на повітрі надано на рис. 15.

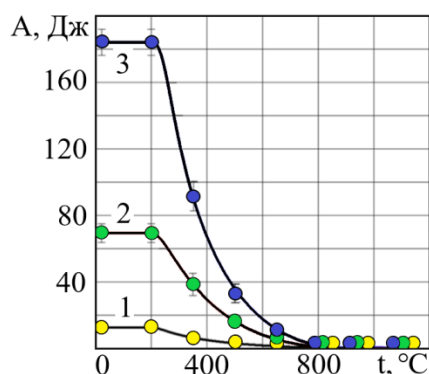


Рис. 14 – Залежність роботи вибивання рідкоскляної суміші, структурованої за ПМЗ-процесом, з 0,5 % (1), 1,5 % (2) і 2,5 % (3) рідкого скла, від температури її попереднього нагріву

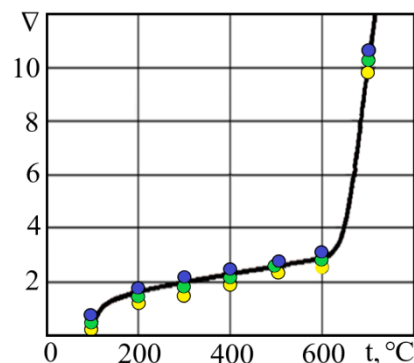


Рис. 15 – Залежність відносної тривалості руйнування рідкоскляних сумішей в киплячій воді (водостійкість), структурованих за ПМЗ-процесом, від температури їх попереднього нагріву на повітрі

З аналізу залежностей рис. 14 та рис. 15 випливає, що робота вибивання піщано-рідкоскляних сумішей, що містять від 0,5 % до 2,5 % (за масою, понад 100 % піску) рідкого скла, і структуровані за ПМЗ-процесом, зі збільшенням температури попереднього нагріву структурованої суміші, знижується з 185...15 Дж до нуля при температурі попереднього нагріву від 800 до 1100 °С.

Виходячи з цього, вибивання стрижнів або їх частин, у яких після контакту з залитим в ливарну форму розплавом не перевищила 600 °С, рекомендовано здійснювати шляхом занурення виливків у воду.

За результатами експериментальних та теоретичних досліджень встановлено, що межа міцності на стиск піщано-рідкоскляної суміші, яка структурована за ПМЗ-процесом, підвищується зі зростанням у складі суміші вмісту рідкого скла, середнього діаметра використаного кварцового піску та силікатного модуля рідкого скла. При цьому середнє значення співвідношень  $\sigma_{СТ}/\sigma_P=5,55$ ,  $\sigma_{СТ}/\sigma_{ВИГ}=3,68$ .

Залежності міцності на стиск піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих за способом ПМЗ, від тривалості мікрохвильової обробки і від масового вмісту рідкого скла, використаного для плакування кварцового піску, представлені на рис. 16.

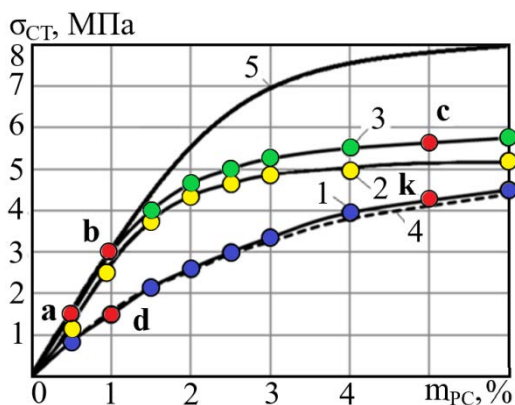


Рис. 16 – Залежність межі міцності на стиск піщано-рідкоскляної суміші, що структурована за ПМЗ-процесом від масового вмісту рідкого скла, використаного для плакування кварцового піску, і від часу структуривання: 1 – 2 хв; 2 – 3 хв; 3 – 4 хв; 4 – межа міцності на стиск при адгезійному характері руйнування суміші; 5 – межа міцності на стиск при когезійному характері руйнування суміші

З аналізу ходу залежностей на рис. 16 випливає, що характер руйнування структурованої суміші не залежить від вмісту рідкого скла, яке пішло на плакування кварцового піску, але залежить від тривалості ПМЗ-процесу, зі збільшенням часу якого змінюється від адгезійного до змішаного і когезійного.

Для визначення типу руйнування піщано-рідкоскляних сумішей, що відповідають точкам a, b, c, d, k на рис. 16, дослідили вигляд поверхонь їх руйнування, яке було викликано розтягуванням зразків. В якості еталонів використовували растрові зображення місць руйнування структурованих сумішей, які представлені на рис. 17.

Оптимізацію за вмістом рідкого скла в піщано-рідкоскляній суміші та її зернового складу (розмірів конгломератів піщинок кварцового піску) проводили симплек-плануванням експериментів з шістьма показниками, гранично-допустимі величини яких приведені в табл. 2.

Оптимізацію зернового складу піщано-рідкоскляної суміші здійснювали для трьох видів конгломератів кварцового піску з рідким склом, а саме:

А – конгломерати з 2,5 % рідкого скла, що пройшли через сито з осередком 0,63 мм, але не пройшли сито з осередком 0,315 мм;

В – конгломерати з 0,5 % рідкого скла, що пройшли через сито з осередком 0,315 мм;

С – конгломерати з 2,5 % рідкого скла, що пройшли через сито з осередком 0,315 мм.

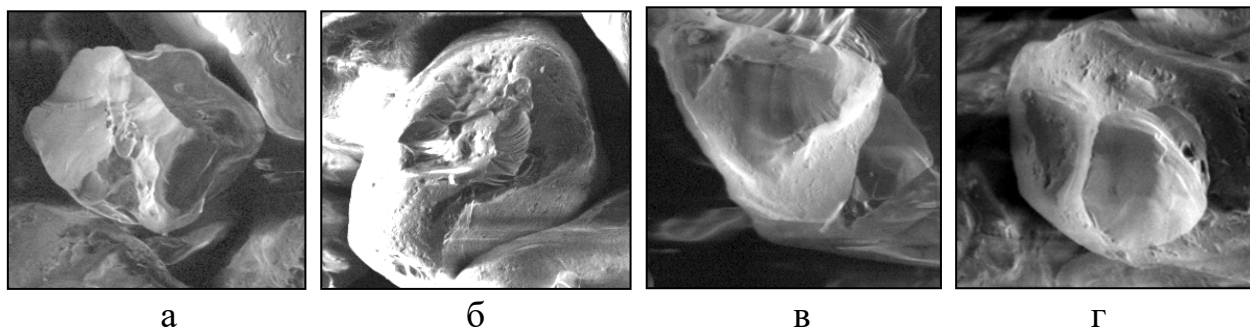


Рис. 17 – Вигляд манжет з когезійним (а, б) та адгезійним (в, г) характером руйнування піщано-рідкоскляних сумішей ( $\times 100$ )

Таблиця 2 – Граничнодопустимі величини показників властивостей формувальної та стрижневої суміші через 3 години після завершення її структурування

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

Відповідно до прийнятої методики, симплексні решітки будували для межі міцності на стиск ( $\sigma_{\text{СТ}}$ ), обсипальності ( $O_c$ ), роботи вибивання при  $20\text{ }^\circ\text{C}$  ( $A_{20}$ ), газопроникності ( $K$ ), уявної щільності ( $\rho$ ), відносної стріли прогину зразка балочного типу ( $\Delta_\epsilon$ ). Результати реалізованої план-матриці досліджень надані в табл. 3.

Таблиця 3 – Реалізована план-матриця експерименту

Код суміші	Відносна маса конгломератів у суміші			Параметри структурованої піщано-рідкоскляної суміші					
	А	В	С	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$
				$\sigma_{\text{СТ}}$ , МПа	$O_c$ , %	$K$ , од	$A_{20}$ , Дж	$\rho$ , $\text{кг/м}^3$	$\Delta_\epsilon$ , %
$X_1$	1			0,96	0,84	405	53	1224	0,13
$X_2$		1		0,74	1,22	152	6,1	1768	0,07
$X_3$			1	2,67	0,55	282	280	1710	0,275
$X_4$	0,5	0,5		1,63	0,57	308	98	1392	0,195
$X_5$	0,5		0,5	1,94	0,62	238	104	1675	0,195
$X_6$		0,5	0,5	2,95	0,26	151	92	1727	0,32
$X_7$	0,33	0,33	0,33	1,29	0,95	364	89	1465	0,16
$X_8$	0,25	0,50	0,25	1,37	0,88	328	79	1490	0,15
$X_9$	0,25	0,25	0,50	1,7	0,81	325	121	1555	0,19
$X_{10}$	0,50	0,25	0,25	1,15	0,94	380	81	1407	0,16

Отримані симплексні-решітки за результатами реалізації симплекс-решітчастого плану Г. Шеффе та розрахунком коефіцієнтів регресії представлені на рис. 18, де зафарбовані поля – неприпустимі значення досліджуваних параметрів структурованої піщано-рідкоскляної суміші.



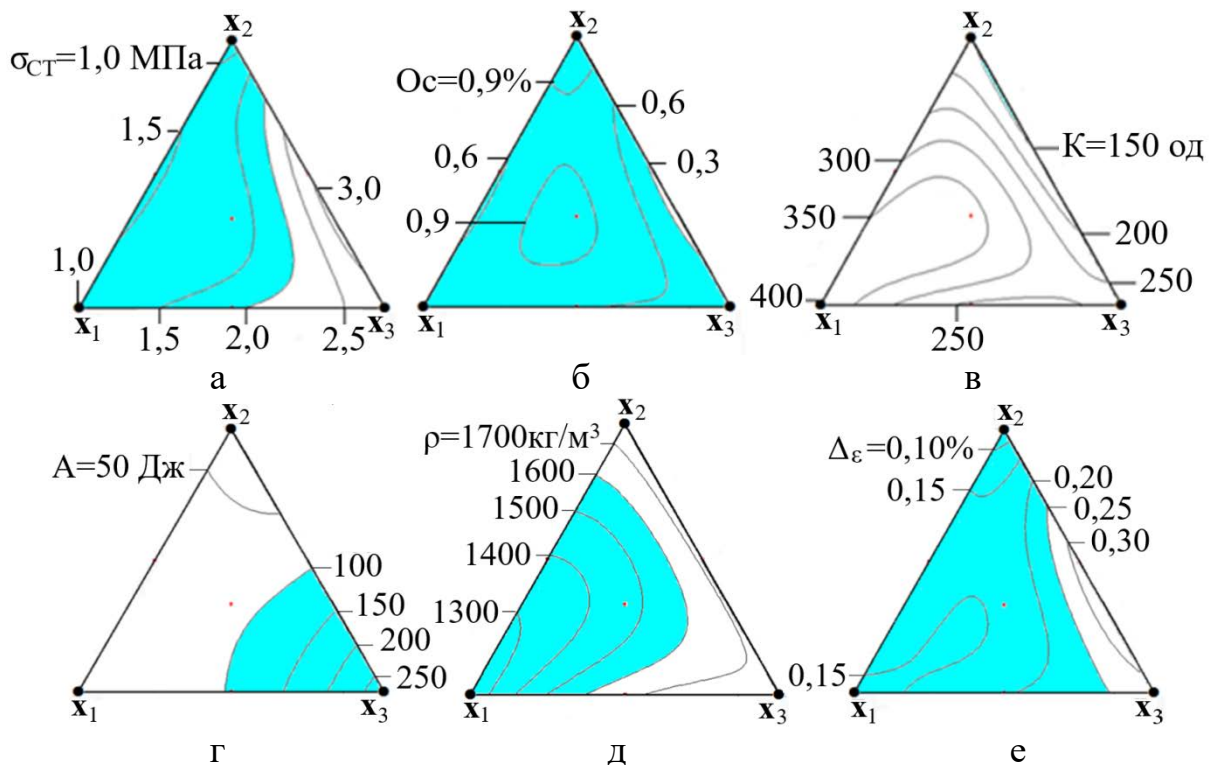


Рис. 18 – Симплексні решітки з зафарбованими полями неприпустимих значень межі міцності на стиск (а), обсіпальності (б), газопроникності (в), роботи вибивання при 20 °С (г), уявної щільності (д), відносної стріли прогину зразка балочного типу (е) структурованої піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом

За результатами накладання масштабованих зображень симплексних трикутників встановлено, що оптимальний склад суміші, що структурована впродовж 5 хв за ПМЗ-процесом в мікрохвильовій печі з потужністю магнетрону 900 Вт, є суха сипуча суміш кварцового піску з натрієвим рідким склом, яка пройшла крізь сито з осередком 0,315 мм та має вміст натрієвого рідкого скла ( $M_{SiO_2} = 2,8 \dots 3,0$ ,  $\rho_2 = 1,42 \dots 1,44 \text{ г/см}^3$ ) у кількості 1,5 % (за масою, понад 100 % піску).

Для встановлення загальної структури передбачуваної залежності між обраними параметрами, заснованої тільки на інваріантності фізичної залежності при зміні масштабів одиниць, використовували  $\pi$ -теорему аналізу розмірностей. В результаті отримали функціональні залежності між властивостями зразків з структурованих формувальних і стрижневих сумішей, у числі яких:

- обсіпальність:

$$Oc = f_0 \cdot \rho^3 \cdot l \cdot \frac{K}{\sigma_{ст}}, \quad (9)$$

- стріла прогину зразка балочного типу:

$$\Delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{l} = f_\varepsilon^* \cdot \rho^2 \cdot \frac{K}{Oc}, \quad (10)$$

- робота вибивання:

$$A = f_A \cdot K^2 \cdot \sigma_{CT}^2 \cdot l \cdot \rho, \quad (11)$$

- межа міцності на стиск:

$$\sigma_{CT} = f_\sigma \cdot \rho \cdot \frac{V_{CB}}{S_{II}} = f_\sigma \cdot \frac{\rho}{\rho_{CB}} \cdot \frac{m_{CB}}{S_{II}}, \quad (12)$$

де  $f_0, f_\varepsilon, f_A, f_\sigma$  – безрозмірні поправочні коефіцієнти,  $\rho, \rho_{CB}$  – уявна щільність структурованої суміші і дійсна щільність затверділого сполучного матеріалу відповідно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $V_{CB}, m_{CB}$  – питомий об'єм ( $\text{м}^3$ ) і питома маса ( $\text{кг}$ ) затверділого сполучного матеріалу в суміші відповідно;  $S_{II}$  – питома площа поверхні зернистої складової структурованої суміші,  $\text{м}^2$ ;  $\sigma_{CT}$  – межа міцності на стиск,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;  $K$  – газопроникність,  $\text{м}^4/(\text{кг} \cdot \text{с})$ ;  $l$  – довжина зразка,  $\text{м}$ ;  $O_c$  – обсіпальність (характеристика поверхневої міцності матеріалу стрижня або форми),  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Адекватність отриманих функціональних залежностей (відносна похибка між експериментальними та розрахунковими даними не перевищує 10 %) підтверджено експериментальними даними роботи, а їх використання дозволить підвищити точність аналізу і прогнозування рівнів цих властивостей.

Інтегрально-ефективні величини теплофізичних параметрів кварцового піску, плакованого рідким склом у кількості від 0,5 до 3,0 % (за масою) і структурованого за ПМЗ-процесом визначали шляхом заливки в такі ливарні форми алюмінієвого сплаву і сірого чавуну. Результати розрахунків теплофізичних властивостей структурованих сумішей при заливці в них сплаву  $\text{Al}+8,5\%\text{Mg}$  і сірого чавуну СЧ200, відповідно наведені в табл. 4 і табл. 5.

Таблиця 4 – Теплофізичні властивості структурованих піщано-рідкоскляних сумішей для сплаву  $\text{Al}+8,5\%\text{Mg}$

$m_{PC}, \%$ (за масою)	$\rho_2,$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$c_2,$ Дж/ (кг·град)	$\lambda_2,$ Вт/ (м·град)	$a_2 \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$b_2,$ Вт·с <sup>0,5</sup> / (м <sup>2</sup> ·град)
0,5	1758	1047	0,526	0,286	984
1,5	1503	923	0,465	0,335	803
3,0	1380	848	0,414	0,353	696

Таблиця 5 – Теплофізичні властивості структурованих піщано-рідкоскляних сумішей для сірого чавуну СЧ200

$m_{PC}, \%$ (за масою)	$\rho_2,$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$c_2,$ Дж/ (кг·град)	$\lambda_2,$ Вт/ (м·град)	$a_2 \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$b_2,$ Вт·с <sup>0,5</sup> / (м <sup>2</sup> ·град)
0,5	1758	1220	0,801	0,373	1311
1,5	1503	1037	0,689	0,442	1036
3,0	1380	902	0,605	0,486	868

Аналіз даних табл. 4 та табл. 5 показує, що в залежності від уявної щільності рідкоскляної суміші, що структурована за ПМЗ-процесом, можливо її використовувати як для виготовлення виливків, забезпечуючи їх відносно інтенсивне затвердіння в ливарній формі, так і для оформлення надливів, у якості теплоізоляційної суміші.

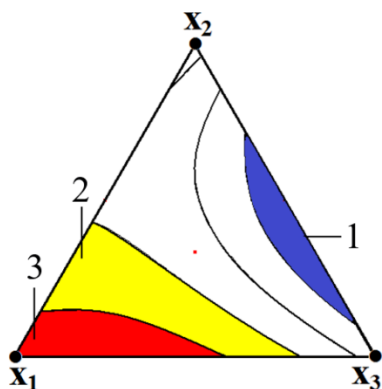


Рис. 19 – Симплексний трикутник хімічного та фракційного складів сумішей,

придатних для: 1 – формування виливків, 2 – теплоізолювання надливів з  $f=1,5/1...2/1$ ; 3 – теплоізолювання надливів з  $f \geq 2/1$  використано, як тепло-ізоляційні у зв'язку з тим, що співвідношення швидкостей об'ємного затвердіння, що лежать в області 1 та 2 складає  $f=1,5/1...2,0/1$ , а в області 1 та 3 –  $f \geq 2,0$ .

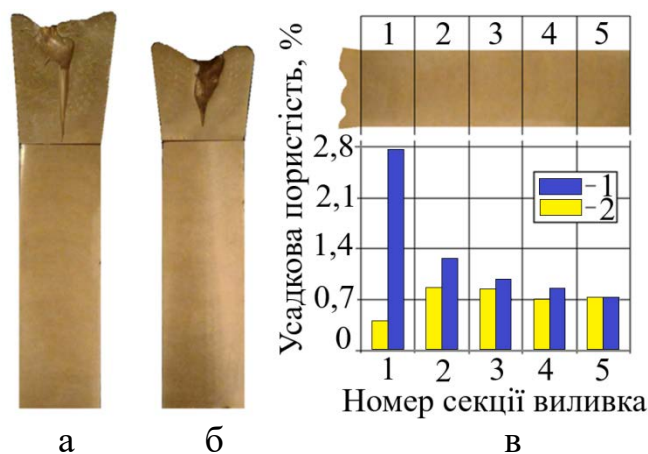


Рис. 20 – Темплети циліндричних виливків з надливами, відлитих в моноблочну (а) та комбіновану (б) ливарну форму, графік розподілу усадкової пористості вздовж циліндричних виливків (в):

- 1 – моноблочна ливарна форма;
- 2 – комбінована ливарна форма

до місця встановлення надливу (дільниця №1 на рис. 20).

З аналізу рис. 20 витікає, що використання піщано-рідкоскляних сумішей з конгломератів різних розмірів дозволяє виготовляти комбіновані ливарні форми з утепленими надливами, які не тільки мають зменшену масу надливу на 17...22 %, але і дозволяють знизити об'єм усадкової пористості у виливках.

Для дослідження можливостей сумішей, які структуровані за ПМЗ-процесом, провели оптимізацію їх хімічного та фракційного складів за планом Г. Шефе (див. табл. 3). За результатами досліджень побудовано симплексний трикутник (див. рис. 19) з ізолініями швидкості об'ємного затвердіння виливків, на якому виділено область складів сумішей, що при їх використанні забезпечують відносно високу швидкість затвердіння виливків і які можуть бути рекомендовані, в якості теплоізоляційних.

З аналізу рис. 19 витікає, що потрібну швидкість об'ємного затвердіння ( $\geq 0,3$  мм/с) виливкам забезпечують суміші, які виготовлені з кварцового піску плакованого рідким склом від 1 % до 2 % (за масою) та мають фракцію піщано-рідкоскляних конгломератів менше 0,315 мм. При цьому, суміші, склад яких знаходиться в області 2 та 3 (див. рис. 19) можуть бути використані, як тепло-ізоляційні у зв'язку з тим, що співвідношення швидкостей об'ємного затвердіння, що лежать в області 1 та 2 складає  $f=1,5/1...2,0/1$ , а в області 1 та 3 –  $f \geq 2,0$ .

Можливість використання суміші з крупних конгломератів, структурованих за ПМЗ-процесом, в якості теплоізоляційної суміші оцінювали за результатами аналізу темплетів циліндричних виливків  $\varnothing 30$  мм. При цьому, в одному випадку для виготовлення виливків використовували моноблочну ливарну форму з суміші типу С (див. табл. 3), в іншому випадку – комбіновану форму, де для виливка використовували ливарну форму з суміші типу С, а для надливу – суміш типу В. Темплети циліндричних виливків зі своїми надливами представлені на рис. 20,а,б, а на рис. 20,в – графік розподілу усадкової пористості за висотою виливків від їхнього торця (дільниця №5 на рис. 20)



За результатами досліджень якості поверхонь виливків, яку оцінювали візуально, встановлено, що якість поверхонь ливарної форми, виготовленої за ПМЗ-процесом, і, відповідно, якість поверхні виливків підвищується, зі збільшенням в суміші вмісту рідкого скла (від 0,5 до 2,5 %), використаного для плакування кварцового піску, та зі зниженням коефіцієнта термічного лінійного розширення матеріалів постійних моделей виливків.

У шостому розділі розглянуті питання щодо особливостей використання плакованого кварцового піску в ПМЗ-процесі, його зберігання, карбонізації на ньому шару рідкого скла, причини виникнення дефектів та їх попередження, що притаманні виключно ПМЗ-процесу, якості виливків та результатів промислового випробування та впровадження у виробництво виливків загальномашинобудівного призначення, опробовано спосіб виготовлення об'ємно-замкнутих ливарних форм за моделями із заморожених піщано-водяних сумішей.

За результатами досліджень встановлено кінетику процесу карбонізації рідкого скла в шарі, яка в залежності відносної зміни маси шару рідкого скла від тривалості витримки на повітрі в клімат-камері і його відносної вологості при  $24 \pm 1$  °C представлена на рис. 21.

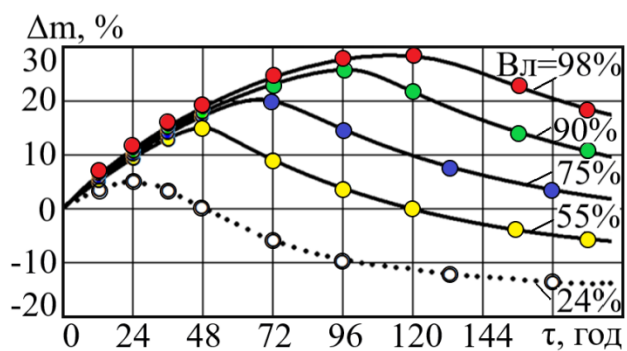


Рис. 21 – Залежність відносної зміни маси шару рідкого скла від тривалості витримки на повітрі в клімат-камері і його відносної вологості при  $24 \pm 1$  °C

Аналіз ходу залежностей на рис. 21 показує, що під час карбонізації затверділого (частково дегідратованого) рідкого скла в тонких шарах практично відсутній індукційний період, а зміна маси шару рідкого скла носить екстремальний характер. Наявність максимумів на кінетичних кривих обумовлена тим, що з початку витримки на повітрі такого піску зі збільшенням відносної вологості повітря інтенсивність карбонізації зростає, у зв'язку з утворенням в ньому карбонату і гідрокарбонату натрію.

В подальшому відбувається зменшення його маси, у зв'язку з завершенням карбонізації і проходженням реакцій поліконденсації з виділенням води при утворенні дікремнієвої або пірокремнієвої кислот. Виникнення у складі рідкого скла цих речовин призводить до зниження міцності структурованих сумішей, як і відхилення їх вихідної температури від 20...26 °C під час структурування за ПМЗ-процесом.

Використання в якості технологічних добавок в складі рідкого скла (за масою): цукру – 1 %, бікарбонату натрію – 5 %; хлористого натрію – 5 %, гліцерину – 3 %, розчину каніфолі (5 %) в гліцерині – 3 %, 5 % та 10 %, карбаміду – 5 %, хлористого натрію йодованого – 5 %, каніфолі – 1 %, а також пари ізопропілового спирту для обробки висушеного шару рідкого скла впродовж 30 хв не попередило процес його карбонізації.

Виходячи з отриманих результатів, якщо плакований пісок буде використаний через 1 добу і більше з моменту завершення його плакування, реко-

мендовано зберігати приготовані піщано-рідкоскляні суміші та вироби з неї в тарі, що герметично закривається, з використанням наважки NaOH з розрахунку 1...3 г сухого NaOH на 10...15 кг плакованого кварцового піску.

Для структурування піщано-рідкоскляних сумішей за ПМЗ-процесом рекомендовано використовувати свіжоприготовлений плакований 0,5...2,5 % рідким склом кварцовий пісок з температурою 20...26 °С, який після сушіння на повітрі до сипучого стану потрібно додатково просушити впродовж 3...5 хв в мікрохвильовому випромінюванні.

Внутрішні тріщини (див. рис. 22) та вимоїни (див. рис. 23) на поверхні стрижнів – дефекти, притаманні для піщано-рідкоскляних сумішей, які структурують виключно за ПМЗ-процесом.

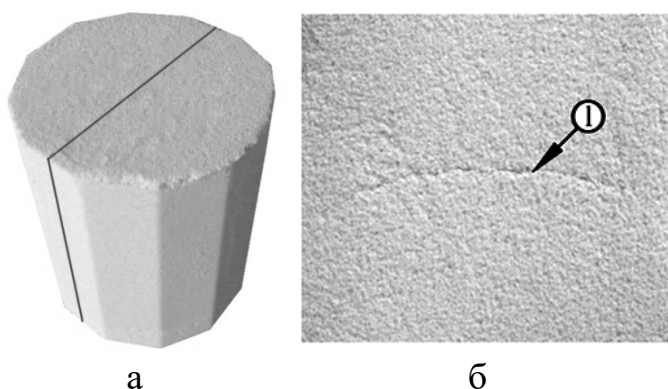


Рис. 22 – Вигляд стрижня (а) і його внутрішньої тріщини (1) в розрізі (б)

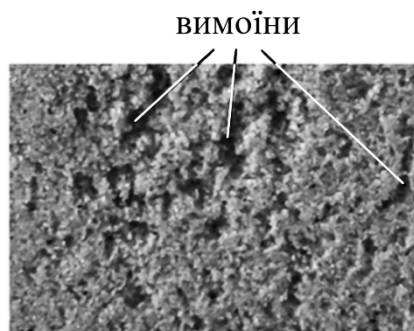


Рис. 23 – Вимоїни на поверхні стрижня

За результатами досліджень механізмів виникнення цих дефектів встановлено, що поява внутрішньої тріщини (див. рис. 22) викликана тимчасовим припиненням обробки суміші мікрохвильовим випромінюванням і пов'язана з відмінностями у величині і характері зміни лінійних розмірів структурованої і неструктурованої частини суміші в оснащенні. Виходячи з цього, з метою попередження появи внутрішніх тріщин структурованих піщано-рідкоскляних сумішей за ПМЗ-процесом рекомендовано проводити при безперервному режимі їх обробки мікрохвильовим випромінюванням.

Вимоїни (див. рис. 23) являють собою поглиблення на поверхні ливарних форм і стрижнів від слідів крапель води, що конденсувалися на холодній поверхні оснащення під час структурування суміші. Для попередження виникнення вимоїн рекомендовано структурування сумішей за ПМЗ-процесом проводити в оснащенні, у якому конденсація вологи на його робочих поверхнях не буде відбуватися, наприклад, в оснащенні температура робочих поверхонь якого під час структурування буде завжди більше точки роси водяної пари, яка утворюється з водяного заряду.

З аналізу візуальної оцінки якості поверхонь циліндричних зразків зі сталі 30Л випливає, що з числа випробовуваних формувальних сумішей найкраща якість поверхні у зразків, отриманих в формах по Resol-CO<sub>2</sub> і ПМЗ-процесу, гірша якість – у зразків, відлитих в формах по Cold-box-amin і CO<sub>2</sub>-процесу.

За результатами металографічного аналізу встановлено, що об'ємний вміст

перліту у зразках, отриманих в формах за Cold-box-amin-процесом, складає 48,7...50,5 %, за Resol-CO<sub>2</sub>-процесом – 58,2...59,9 %, за CO<sub>2</sub>-процесом – 37,1...39,3 %, за ПМЗ-процесом – 49,7...52,1 %. Такі дані про структуру сталі опосередковано свідчать про те, що з числа досліджених ливарних форм найбільша швидкість охолодження виливків у формі, виготовленої за Resol-CO<sub>2</sub>-процесом, а в формі, виготовленої за CO<sub>2</sub>-процесом – найменша. У той же час, швидкість охолодження виливків у формах, виготовлених за ПМЗ-процесом, порівнянна зі швидкістю охолодження виливків у формах за Cold-box-amin-процесом.

Для визначення виду і класифікації пригару за Ф.Д. Оболенцевим, в ливарних формах із піщано-рідкоскляних сумішей з 1,5 % рідкого скла, що структуровані за ПМЗ-процесом, виготовляли виливки зі сталі, сірого чавуну, бронзи, алюмінієвого сплаву (див. табл. 6).

Таблиця 6 – Вигляд поверхонь циліндричних виливків, що виготовлені за ПМЗ-процесом, категорія і бал пригара за класифікаціями Ф.Д. Оболенцева

Марка сплаву	Вигляд поверхні після очищення	Марка сплаву	Вигляд поверхні після очищення
Сталь 30Л (пригар дуже слабкий, бал – 1)		Бронза БрА9Ж3Л (пригар дуже слабкий, бал – 1)	
Сталь 20Х27Н18С2Л (пригар дуже слабкий, бал – 1)		Бронза БрО5Ц5С5 (пригар слабкий, бал – 2)	
Чавун сірий СЧ200 (пригар слабкий, бал – 2)		Сплав алюмінієвий АЛ2 (пригару немає, бал – 1)	

З аналізу даних табл. 6 випливає, що механічний пригар на всіх без винятку зразках був відсутній. Пригар на зразках зі сталі і чавуну відноситься до різновидів хімічного пригару. При цьому шар пригару на сталевих зразках був крихким і відокремлювався вже під час вибивання виливка з форми. Пригар на чавунному зразку був пухкий важковидалаємий. Поверхня зразків з бронзи і алюмінієвого сплаву була покрита шаром термічного пригару, що виник в результаті спікання силікату натрію в формувальній суміші, прилеглої до поверхні виливків.

Шорсткість поверхні виливків, виготовлених в формах, що структуровані за ПМЗ-процесом, знаходиться на рівні шорсткості поверхні виливків, що виготовляють в оболонкових формах, про що свідчать дані табл. 7 та рис. 24.

Виходячи з цього, використовуючи результати експериментальних та теоретичних досліджень розроблено відповідні аналітичні залежності та на їх основі при ширині клейового шва 1 см побудовані номограми для визначення мінімально допустимої міцності при розтягуванні клейового з'єднання для форм без стрижнів,

що надано на рис. 25, та номограма для визначення мінімально допустимої міцності при розтягуванні клейового з'єднання стрижня у формі, що надано на рис. 26.

Таблиця 7 – Показник Ra і ступінь точності поверхні відповідно до ДСТУ 8981:2020 циліндричних виливків довжиною від 100 до 250 мм

Сплав вилівка	Профілограма (див. рис. 22)	Ra, мкм	Ступінь точності
30Л	а	12,6	10
40Х24Н18С2Л	б	8,7	8
СЧ200	в	13,2	10
БрО5Ц5С5	Г	10,8	9
БрА9Ж3Л	д	7,6	7

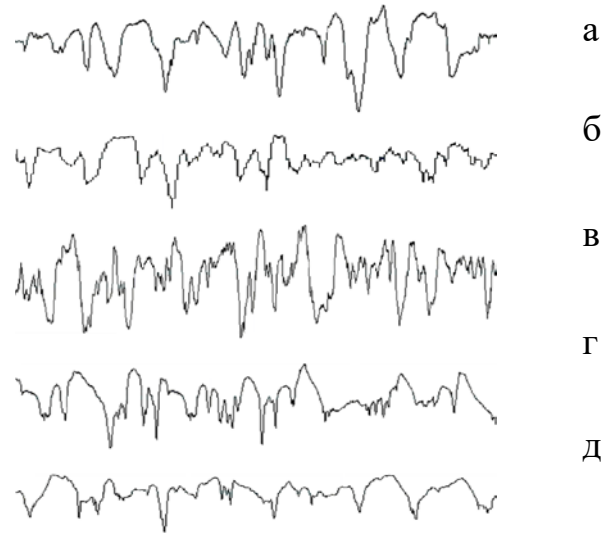


Рис. 24 – Профілограми поверхні виливків зі сталі 30Л (а), 40Х24Н18С2Л (б), сірого чавуну СЧ200 (в), бронзи БрО5Ц5С5 (г), БрА9Ж3Л (д) при довжині траси 3 мм

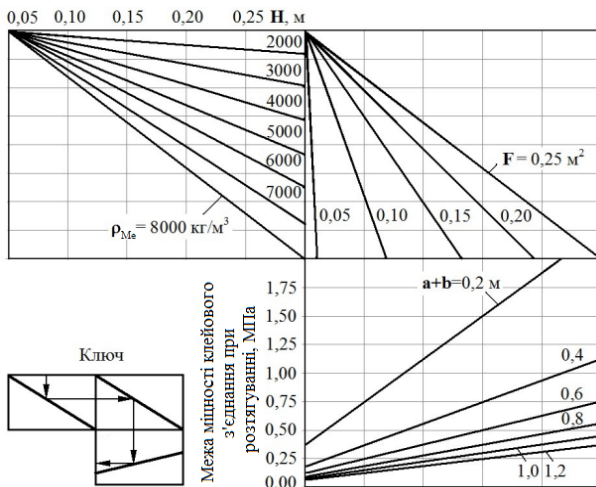


Рис. 25 – Номограма для визначення мінімально допустимої міцності при розтягуванні клейового з'єднання для форм без стрижнів:  $H$  – металостатичний тиск в формі;  $F$  – площа горизонтальної проекції вилівка на верхній півформі;  $\rho_{Me}$  – щільність рідкого металу в формі;  $a, b$  – довжина та ширина ливарної форми

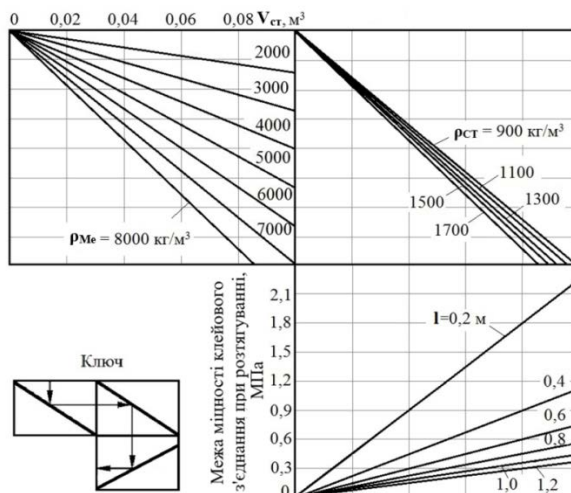
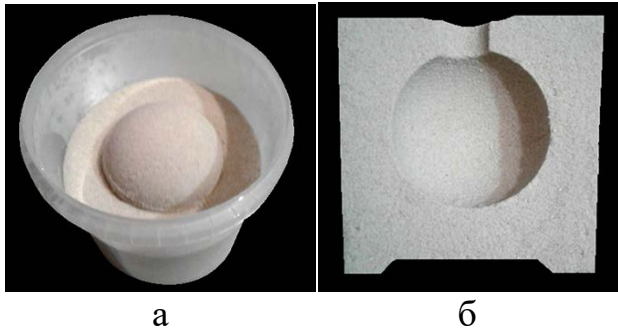


Рис. 26 – Номограма для визначення мінімально допустимої міцності при розтягуванні клейового з'єднання стрижня консольно встановленого у формі:  $V_{ст}$  – об'єм тіла стрижня;  $\rho_{Me}$  – щільність рідкого металу в формі;  $\rho_{ст}$  – щільність стрижня;  $l$  – довжина клейового шва



За результатами попередніх досліджень випробувано спосіб виготовлення об'ємно-замкнутих ливарних форм за ПМЗ-процесом за моделями із заморожених піщано-водяних сумішей (див. рис. 27), де сама заморожена модель буде виконувати функцію водяного заряду під час структурування суміші, в якій вона заформована.



а

б

Рис. 27 – Вигляд оснащення і результату виготовлення об'ємно-замкнутої ливарної форми виливка «Куля»: а – частково засипана плакованим піском заморожена модель в опоці; б – розріз об'ємно-замкнутої ливарної форми виливка «Куля»

суміші за  $\text{CO}_2$ -процесом і за ПМЗ-процесом проводили за результатами аналізу якості виливків «Плита решітки» серійного виробництва підприємства ТОВ «ПК «Перспектива» (м. Дніпро), на поверхні якій найбільш часто зустрічаються засмічення, спаї і газові раковини. При цьому, близько 52 % виготовлених виливків піддають ремонту, а  $\sim 5$  % виливків остаточно бракують через невідповідність точності їх розмірів вимогам креслення.

Для оцінювання впливу способу структурування піщано-рідкоскляних сумішей ливарних форм на точність розмірів виливка «Плита решітки», в якості показників точності були прийняті результати вимірювань (див. рис. 28) його наступних розмірів:  $l_{301} = 301$  мм,  $l_{108} = 108^{+1,5}$  мм,  $l_{242} = 242^{-2}$  мм.

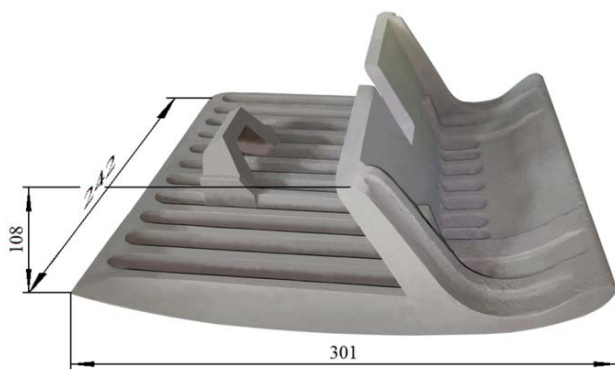


Рис. 28 – Контрольовані розміри виливка «Плита решітки»

Встановлено, що для виготовлення об'ємно-замкнутих форм, заморожені моделі доцільно виготовляти з суміші кварцового піску і 5...10 % води (за масою, понад 100 % піску) і для використання заморожувати при  $-17$  °С. Спосіб виготовлення об'ємно-замкнутих форм за замороженими піщано-водяним моделями за ПМЗ-процесом рекомендовано для використання у виробництві дрібних виливків зі сплавів на основі заліза, міді, алюмінію загальномашинобудівного призначення в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва лиття.

Порівняльну оцінку якості виливків, виготовлених із піщано-рідкоскляної

Результати визначення контрольних розмірів виливків-представників, отриманих в формах, виготовлених за  $\text{CO}_2$ -процесом (144 виливка) і за ПМЗ-процесом (150 виливків), показують, що точність контрольованих розмірів виливків, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом дещо вища, ніж виливків, виготовлених в формах за  $\text{CO}_2$ -процесом. При цьому остаточний брак по невідповідності розмірів виливків, виготовлених в формах за ПМЗ-процесом, склав 1,3 %, а за  $\text{CO}_2$ -процесом – 4,9 %.

У той же час виправний брак виливків за ПМЗ-процесом склав лише 7 %, а величина «розкиду» відхилень контрольних розмірів у виливків за ПМЗ-процесом менше, ніж у виливків за  $\text{CO}_2$ -процесом, про що свідчать криві розподілу розмірів виливків, представлені на рис. 29. Слід зазначити, що у виливків, які були виготовлені в формах за ПМЗ-процесом, дефекти типу спаїв і газових раковин практично були відсутні, а засмічення мали локальний точковий характер.

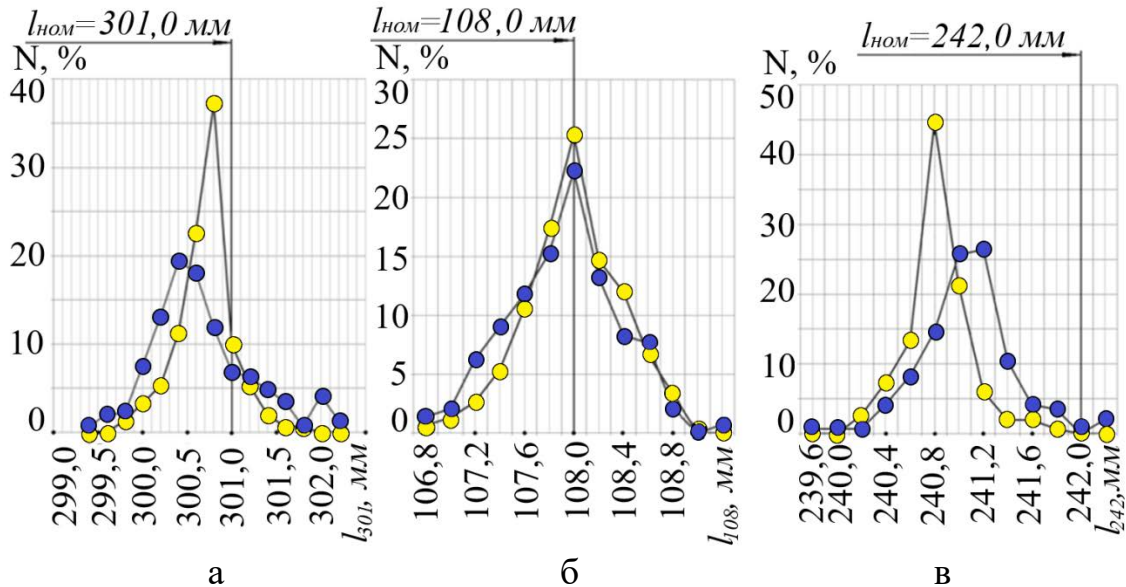


Рис. 29 – Розподіл контрольованих розмірів виливків «Плита решітки»  $l_{301}$  (а),  $l_{108}$  (б) і  $l_{242}$  (в), виготовлених в піщано-рідкоскляних формах, які були структуровані за  $\text{CO}_2$ - і ПМЗ-процесом: ● –  $\text{CO}_2$ -процес, ● – ПМЗ-процес

На сьогодні ПМЗ-процес з позитивним результатом випробування в ливарному цеху ПП «БУД-МАШ» (м. Житомир), впроваджений в ливарному цеху ТОВ «ПК«Перспектива» (м. Дніпро) і ПрАТ «Одеський машинобудівний завод» (м. Одеса), а наукові результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес Національної металургійної академії України.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведені теоретичні та технологічні узагальнення в рамках вирішення науково-технічної проблеми створення екологічно безпечних ливарних форм та стрижнів з піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані за ПМЗ-процесом, для виливків загальномашинобудівного призначення, шляхом визначення закономірностей формування властивостей і кінетики структурування суміші, оптимізації її складу та реалізації результатів досліджень у виробництві, що зумовлює підвищення екологічної безпеки та санітарно-гігієнічних умов виробництва, скорочення циклу та енергоємності процесу виготовлення виливків, підвищення їх якості та, відповідно, зниження їх собівартості. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень в області виготовлення ливарних форм та стрижнів були знайдені нові наукові та технологічні рішення, отримані практичні результати і зроблені наступні висновки:

1. За результатами аналізу науково-технічної та патентної літератури, сучасних умов поточного виробництва виливків в ливарних цехах України, відомих способів виробництва, сполучних матеріалів та якості виливків загальномашинобудівного призначення, встановлено, що робота, яка спрямована на розробку наукових і технологічних основ структурування в паромікрохвильовому середовищі піщано-рідкоскляних сумішей з метою встановлення механізму, кінетики та закономірностей структурування в паромікрохвильовому середовищі сипучого кварцового піску, плакованого рідким склом, і результату його застосування на властивості ливарних форм та стрижнів, якість дрібних виливків загальномашинобудівного призначення є актуальною.

2. Реальна потужність мікрохвильового випромінювання, що генерується в мікрохвильових печах зі стоячею хвилею при частоті випромінювання 2,45 ГГц і номінальною потужністю магнітрону 700...1200 Вт на вісі обертового столу в резонаторі становить  $\chi=0,40...0,72$  від номінальної потужності магнетрону мікрохвильової печі та з віддаленням від неї знижується за статечним законом і на відстані більше ~60 мм знижується до  $\chi=0,29...0,36$ . При цьому, швидкість підвищення температури матеріалу, що нагрівають, прямо пропорційна його відносній діелектричній проникності, яка (для мінералів) залежить виключно від його хімічного складу і при  $\epsilon \leq 10$  з точністю, прийнятною для інженерних розрахунків, може бути визначена за правилом адитивності на основі масового вмісту в ньому елементарних речовин (оксидів) та величини їх діелектричної проникності.

3. Згідно з розробленим описом механізму масопереносу рідкого скла в пласкому капілярі під дією мікрохвильового випромінювання, його перенесення в капілярі проходить в результаті багаторазового повторення етапів виникнення та руйнування капсул рідкого скла за схемою подібною ланцюговій реакції.

4. Згідно з розробленим описом механізму структурування піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом, манжети з рідкого скла є наслідком конденсації водяної пари з водяного заряду на плакованій поверхні піщинок піщано-рідкоскляної суміші, розчинення та гідратації рідкого скла в плакованих шарах у конденсаті, спінювання рідкого скла, яке насичене водою, часткове випаровування води зі спіненого рідкого скла, спадання піни рідкого скла та його плівкова течія по поверхням піщинок до точок їх контакту між собою під дією капілярних сил з остаточною дегідратацією рідкого скла в манжетах.

5. За результатами визначеної кінетики структурування піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом встановлено, що при ПМЗ-процесі виділення води з піщано-рідкоскляної суміші, що структурують, проходить в три етапи. Перший етап – при ~100 °С, другий – при 109...118 °С, третій – при 119...128 °С. При цьому переніс рідкого скла в піщано-рідкоскляній суміші, проходить за наступними механізмами:

- при 109...118 °С перенос рідкого скла відбувається шляхом його спінювання, яке виникає за рахунок інтенсивного випаровування з нього води з величиною енергії активації  $E_{\text{п}} = 23,9$  кДж/моль;

- при 119...128 °С перенос рідкого скла відбувається шляхом його в'язкої течії з величиною енергії активації  $E_{\text{п}} = 49,3$  кДж/моль.

6. Для структурування піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом доцільно використовувати кварцовий пісок з середнім розміром піщинок 0,16...0,25 мм та вмістом глини до 0,1 % (за масою), який плаковано 0,5...2,5 % (за масою) рідким склом, що при масі водяного заряду 1 г дозволяє структурувати від 2400 до 500 г суміші протягом 8...4 хв. При цьому, маса структурованої піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом збільшується зі зменшенням маси рідкого скла, що використане на плакування піску, та за законом квадратного кореня зі збільшенням часу структурування.

7. Для виготовлення ливарних форм та стрижнів з піщано-рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом оптимальним є сухий кварцовий пісок, плакований рідким склом, який пройшов крізь сито з осередком 0,315 мм та має вміст натрієвого рідкого скла ( $M_{SiO_2}=2,8...3,0$ ,  $\rho_2=1,42...1,44$  г/см<sup>3</sup>) у кількості 1,5 % (за масою, понад 100 % піску). Структурування піщано-рідкоскляної суміші оптимізованого складу за ПМЗ-процесом при раціональному рівні його технологічних параметрів забезпечить ливарним формам та стрижням наступний рівень властивостей:  $\sigma_{CT}=2,9...3,0$  МПа,  $O_c=0,26...0,30$  %,  $K=150...155$  од,  $\Gamma=3...5$  см<sup>3</sup>/г,  $A_{20}=92...100$  Дж,  $\rho=1720...1730$  кг/м<sup>3</sup>,  $\Delta_\epsilon=0,32$  %, для сплаву Al+8,5%Mg  $b_2=850...750$  (Вт·с<sup>0,5</sup>)/(м<sup>2</sup>·град), для сірого чавуну СЧ200  $b_2=1000...1100$  (Вт·с<sup>0,5</sup>)/(м<sup>2</sup>·град), що відповідає сучасним вимогам до ливарних форм та стрижнів. В той же час структурована за ПМЗ-процесом піщано-рідкоскляна суміш з кварцового піску, плакованого тим же рідким склом у кількості 2,5 % та розміром конгломератів 0,315...0,63 мм, відносно вище наведеної піщано-рідкоскляної суміші, може бути використана в ливарній формі як теплоізоляційна.

8. Одержано функціональні залежності між обсіпальністю, крихкістю, міцністю, роботою вибивання виливків з форм і стрижнів з виливків і рядом параметрів і властивостей структурованих формувальних та стрижневих сумішей, які визначають на зразках за стандартними і загальноприйнятими методиками.

9. Для піщано-рідкоскляної суміші, яка структурована за ПМЗ-процесом і містить кварцовий пісок, плакований 0,5...3,0 % рідкого скла, та після вібраційного ущільнення має уявну щільність від 1380 до 1758 кг/м<sup>3</sup>, відносно алюмінієвого сплаву і сірого чавуну, встановлено інтегрально-ефективні значення її теплофізичних властивостей.

10. За результатами дослідження кінетики карбонізації частково де гідратованого рідкого скла в тонкому шарі на повітрі встановлено, що інтенсивність карбонізації рідкого скла при нормальній температурі, зростає зі збільшенням відносної вологості повітря. Тому, зберігання кварцового піску, плакованого рідким склом, слід проводити в тарі, що герметично закривається, з використанням наважки їдкового натру або в закритій тарі впродовж не більше 1 доби.

11. Робота вибивання піщано-рідкоскляних сумішей, що містять від 0,5 % до 2,5 % (за масою, понад 100 % піску) рідкого скла, і структуровані за ПМЗ-процесом, зі збільшенням температури попереднього нагріву структурованої піщано-рідкоскляної суміші, знижується з 185...15 Дж до нуля при температурі попереднього нагріву від 800 до 1100 °С. Вибивання стрижнів або їх частин, у яких після контакту з залитим в ливарну форму розплавом не перевищила 600 °С,



рекомендовано здійснювати шляхом занурення виливків у воду.

12. Характер механічного руйнування суміші, структурованої за ПМЗ-процесом, не залежить від вмісту рідкого скла, яке пішло на плакування кварцового піску, але залежить від тривалості процесу ПМЗ зі збільшенням часу якого змінюється від адгезійного (до 2 хв) до змішаного (2...4 хв) і когезійного (понад 4 хв).

13. Для попередження появи внутрішніх тріщин в ливарних формах та стрижнях, структурування їх піщано-рідкоскляних сумішей за ПМЗ-процесом треба проводити в безперервному режимі обробки мікрохвильовим випромінюванням. Поверхневий дефект вимоїна є наслідком конденсації водяної пари з водяного заряду на «холодних» робочих поверхнях модельно-стрижневого оснащення під час мікрохвильової обробки суміші. Пригар на виливках носить термічний характер і відноситься до легковидаляемого.

14. Ступінь точності поверхні виливків з бронзи, сталі та чавуну, отриманих в форми, що виготовлені за ПМЗ-процесом, відповідає 7...10 класу, а виливків з алюмінієвих сплавів – 5...14 класу відповідно до ДСТУ 8981:2020.

15. Результати роботи з позитивним результатом пройшли промислове випробування на ПП «БУД-МАШ» (м. Житомир), впроваджені в ливарних цехах ТОВ «ПК «Перспектива» (м. Дніпро), ПрАТ «Одеський машинобудівний завод» (м. Одеса) та в навчальний процес Національної металургійної академії України.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

*Статті у виданнях, які входять до наукометричних баз даних*

*Scopus та Web of Science:*

1. **Solonenko L.I.**, Bilyi O.P., Repiakh S.I., Kimstach T.V., Uzlov K.I. Heating rate of granular inorganic materials by microwave radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 2. Pp. 37-41. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/037>
2. **Solonenko L.I.**, Usenko R.V., Uzlov K.I., Dziubina A.V., Repiakh S.I. Carbonization and crushability of structured sand-sodium-silicate mixtures. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 5. Pp. 40-46. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-5/040>
3. **Solonenko L.I.**, Usenko R.V., Dziubina A.V., Uzlov K.I., Repiakh S.I. Sodium silicate solute foaming in a flat slot-type capillary under microwave radiation influence. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 6. Pp. 34-40. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/034>
4. **Solonenko L.I.**, Repiakh S.I., Uzlov K.I., Mamuzich I., Kimstach T.V., Bilyi O.P. Kinetics of quartz sand and its mixtures drying by microwave radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. №1. Pp. 68-77. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/068>
5. **Solonenko L.I.**, Repiakh 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. Pp. 41-46. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-4/041>

6. **Solonenko L.I.**, Repiakh S.I., Uzlov K.I., Dziubina A.V., Abramov S.O. Sand-sodium-silicate mixtures structured in steam-microwave environment effective values of thermo-physical properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 6. Pp. 66-71. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/066>
7. Liutyi R.V., **Solonenko L.I.**, Osipenko I.O., Fedorov M.M., Morozov B.I. Physicochemical structure features of refractory compositions with inorganic binders. *Physics and chemistry of solid state*. 2022. T. 23. № 3. Pp. 612-619. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.3.612-619>
8. Ponomarenko O., Yevtushenko N., Lysenko T., **Solonenko L.**, Shynsky V. A new technology for producing the polystyrene foam molds including implants at foundry industry. *Lecture notes in mechanical engineering. DSMIE 2019*. 2019. Pp. 430-437. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_43)

**Статті у фахових виданнях:**

9. **Солоненко Л.И.** Некоторые особенности сушки литейных форм и стержней в области стоячих волн сверхвысокочастотного излучения. *Металл и литье Украины*. 2020. №1 (320). С. 69-78. <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.01.069>
10. **Солоненко Л.И.**, Реп'ях С.І., Узлов К.І. Кінетика структуривання піщано-рідкоскляних сумішей паро-мікрохвильовим затвердінням. *Теорія і практика металургії*. 2019. №4. С. 44-56. <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.07>
11. **Солоненко Л.И.**, Реп'ях С.І., Узлов К.І., Усенко Р.В. Міцність піщано-рідкоскляної суміші, яка структурована способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2019. №6. С. 41-48. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2019.06>
12. **Солоненко Л.И.**, Реп'ях С.І., Білий О.П., Усенко Р.В., Узлов К.І. Властивості і структури компонентів піщано-рідкоскляних формувальних сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 1. С. 81-92. <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.11>
13. **Solonenko L.**, Prokopovitch I., Repyakh S., Sukhoi K., Dmytrenko D. System analysis of modern areas of increasing environmental and sanitary hygienic safety of using cold hardening mixtures in foundry. *Proceedings of Odessa Polytechnic University: Scientific, science and technology collected articles*. 2019. № 1 (57). Pp. 90-98 <https://doi.org/10.15276/opu.1.57.2019.11>
14. Осипенко І.О., **Солоненко Л.И.**, Білий О.П. Системне використання пилу техногенного походження у складі фосфатних холоднотвердіючих сумішей. *Системные технологии*. 2018. № 5 (118). С. 97-104. <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/41>
15. **Солоненко Л.И.**, Білий О.П., Узлов К.І. Функціональні залежності між властивостями зразків з структурованих формувальних і стрижневих сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6. С. 93-100. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.12>
16. **Solonenko L.**, Repyakh S., Uzlov K., Kimstach T. Crushing character of sand-sodium-silicate mixtures structured by steam-microwave treatment. *Proceedings of Odessa Polytechnic University: Scientific, science and technology collected articles*. 2020. № 3 (62). Pp. 5-13. <https://doi.org/10.15276/opu.3.62.2020.01>
17. **Солоненко Л.И.**, Реп'ях С.І. Міцність піщано-рідкоскляних сумішей, що струк-

- турували паро-мікрохвильовою обробкою. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2020. № 3. С. 39-47. <https://doi.org/10.34185/0543-5749.2020-3-39-47>
18. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І., Узлов К.І. Випаровування малих мас води при їх обертанні в області стоячих хвиль мікрохвильового випромінювання. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2021. №1. С. 57-67. <https://doi.org/10.34185/0543-5749.2021-1-57-67>
19. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І. Виготовлення ливарних форм паро-мікрохвильовим затвердінням за моделями із заморожених піщано-водяних сумішей. *Метал та лиття України*. 2021. №1 (324). С. 38-45. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.01.038>
20. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І., Узлов К.І. Оптимізація зернового складу піщано-рідкоскляних сумішей для структурування способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2021. №1. С. 28-38. <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2021.05>
21. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І. Внутрішні тріщини у стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Метал та лиття України*. 2021. №2 (325). С. 52-59. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.052>
22. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І., Узлов К.І., Білий О.П., Усенко Р.В. Вибиваємість з виливків піщано-рідкоскляних сумішей, структуровані за способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Теорія і практика металургії*. 2021. №1. С. 37-45. <https://doi.org/10.34185/tpm.2.2021.05>
23. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І., Узлов К.І., Білий О.П., Усенко Р.В., Білий А.П., Іванова Л.Х. Прогнозування властивостей піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Теорія і практика металургії*. 2021. №5. С. 70-77. <https://doi.org/10.34185/tpm.5.2021.08>
24. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І., Білий О.П. Вплив піщано-рідкоскляних форм, структурованих паро-мікрохвильовим затвердінням, на пригар і шорсткість поверхні виливків. *Метал та лиття України*. 2021. №3 (326). С. 50-61. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.03.050>
25. **Солоненко Л.І.** Газотворність піщано-рідкоскляних формувальних стрижневих сумішей. *Процеси лиття*. 2021. №3 (145). С. 44-52. <https://doi.org/10.15407/plit2021.03.044>
26. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І., Узлов К.І., Іванова Л.Х. Склеювання рідким склом структурованих піщано-рідкоскляних сумішей. *Теорія і практика металургії*. 2021. №3. С. 48-55. <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2021.07>
27. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І., Узлов К.І., Білий О.П. Вплив піщано-рідкоскляних формувальних стрижневих сумішей, структурованих за способом паро-мікрохвильового затвердіння, на якість дрібних виливків. *Метал та лиття України*. 2021. №4 (327). С. 64-74. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.04.067>
28. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І., Узлов К.І. Структурування формувальних та стрижневих сумішей за способом паро-мікрохвильового затвердіння. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2021. №2. С. 23-31. <https://doi.org/10.34185/0543-5749.2021-2-23-31>

29. **Солоненко Л.І.** Деякі особливості процесу структурування піщано-рідкоскляної суміші у паро-мікрохвильовому середовищі. *Процеси лиття*. 2022. №1. С. 57-66. <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.057>
30. **Солоненко Л.І.** Вимоїни на піщано-рідкоскляних формах та стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі. *Метал та лиття України*. 2022. № 1. С. 54-61. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.054>
31. **Солоненко Л.І.,** Реп'ях С.І., Узлов К.І., Карпова Т.П. Характер механічного руйнування піщано-рідкоскляних сумішей, що структуровані у паро-мікрохвильовому середовищі. *Теорія і практика металургії*. 2022. №1. С. 43-49. <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2022.06>
32. **Солоненко Л.І.,** Реп'ях С.І., Узлов К.І., Мазорчук В.Ф. Вплив ливарної форми і перегріву розплаву алюмінієвої бронзи на структуру виливків і якість їх поверхні. *Метал та лиття України*. 2022. № 2. С. 59-71. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.02.059>

#### **Патент на винахід:**

33. Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідкоскляної суміші: пат. 122538 Україна: МПК В22С 9/10, 9/12. № а 201901350; заявл. 11.02.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22. 7с.
34. Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідкоскляної суміші: пат. 123068 Україна: МПК В22С 9/10, 9/12. № а 201901348; заявл. 11.02.2019; опубл. 10.02.2021, Бюл. № 6. 3 с.
35. Спосіб виготовлення ливарних форм за одноразовими замороженими моделями: пат. 125146 Україна: МПК В22С 9/04, 9/02, 7/02. № а 201910047; заявл. 27.09.2019; опубл. 19.01.2022, Бюл. № 3. 6 с.

#### **Патент на корисну модель:**

36. Спосіб виготовлення комбінованої ливарної форми із сухої суміші: пат. 149146 Україна: МПК В22С 9/12. № и 202102879; заявл. 31.05.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. № 42. 4 с.

#### **Тези доповідей міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій:**

37. **Солоненко Л.І.,** Репях С.І., Усенко Р.В., Баца І.В. Технологические добавки в песчано-жидкостекольных смесях. *Topical issues of the development of modern science: Abstracts of II International Scientific and Practical Conference (Sofia, 16-18 October. 2019)*. Sofia, 2019. Pp. 62-68.
38. **Солоненко Л.І.,** Репях С.І. Осыпаемость жидкостекольных форм и стержней. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, травень 30-31. 2019)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 178-179.
39. **Солоненко Л.І.,** Репях С.І. Работа выбивки песчано-жидкостекольных стержневых смесей из отливок. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, травень 30-31. 2019)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 173-177.
40. **Солоненко Л.І.,** Репях С.І. Хрупкость структурированных смесей литейных форм и стержней. *Литво. Металургія. 2019: матеріали XV Міжна-*

- родної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 21-23 травня. 2019). Запоріжжя, АА Тандем. 2019. С. 192-194.
41. **Солоненко Л.И.**, Усенко Р.В., Репях С.И. Связующие материалы неорганического происхождения, отверждаемые физическими способами. *Science and society: 12<sup>th</sup> International conference (Canada, June 7. 2019)*. Canada 2019. Pp. 18-22.
42. **Солоненко Л.И.**, Усенко Р.В., Белый А.П., Репях С.И. Характеристика некоторых способов литья и смесей одноразовых форм и стержней для отливок массой до 300 кг. *Perspectives of worlds science and education: Abstracts of I International Scientific and Practical Conference (Osaka, 2-4 October. 2019)*. Osaka, 2019. Pp. 202-210.
43. **Солоненко Л.И.**, Репях С.И. Оценка реального уровня мощности СВЧ-излучения в рабочей камере СВЧ-печи. *Priority directions of science development: Abstracts of International Scientific and Practical Conference (Lviv, 28-29 October. 2019)*. Lviv, 2019. Pp. 122-125.
44. **Солоненко Л.И.**, Реп'ях С.І. Матеріальний баланс системи «водяна пара-пористе тіло» при атмосферному тиску. *Advance of science: Proceeding of Articles the International Scientific Conference (Czech Republic, 5 April. 2019)*. Czech Republic, 2019. Pp. 27-30.
45. **Солоненко Л.И.**, Репях С.И. Влияние СВЧ-излучения на распределение влаги в песке, находящемся в емкости трубчатого типа. *Литво. Металургія. 2019: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 21-23 травня. 2019)*. Запоріжжя, 2019. С. 190-192.
46. **Солоненко Л.И.**, Репях С.И., Усенко Р.В., Бежанова А.Н. Склеивание безопочных полуформ для производства бесстержневых отливок. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні: матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 28-29 квітня. 2020)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. С. 114-116.
47. **Солоненко Л.И.**, Репях С.И., Белый А.П., Гуцу Т.А. Расчет минимально-допустимой прочности клеевых соединений литейных стержней. *Литво. Металургія. 2020: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (8-10 вересня 2020 р., м. Запоріжжя)*. Запоріжжя, АА Тандем, 2020. С. 140–142.
48. **Солоненко Л.И.**, Реп'ях С.І., Білий О.П., В'юнник І.В. Масоперенос силікату натрію в капілярах щільного типу. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021: матеріали науково-технічної конференції, 28...29 квітня 2021 р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 165-167.
49. **Солоненко Л.И.**, Реп'ях С.І. Структурування плакованого кварцового піску паро-мікрохвильовим затвердінням. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021: матеріали науково-технічної конференції, 28...29 квітня 2021 р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 168-169.
50. **Солоненко Л.И.**, Реп'ях С.І., Усенко Р.В., Кириченко Р.Д. Виготовлення ливарних форм паро-мікрохвильовим затвердінням по заморожених піщано-водя-

них моделях. *Литво. Металургія. 2021: Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (18-20 вересня 2021 р., м. Запоріжжя)*. Запоріжжя, АА Тандем, 2021. С. 190-192.

51. **Солоненко Л.І.**, Узлов К.І., Реп'ях С.І. Новий спосіб виготовлення форм та стрижнів для виробництва виливків залізничного транспорту. *Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп.: матеріали 81 Міжнарод. наук.-практ. конф., 22–23 квіт. 2021 р. Дніпров. нац. ун-т. залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпро, 2021. С. 233-235.

52. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І., Мазорчук В.Д. Тривалість нагріву та випаровування води з парних наважок масою до 100 г мікрохвильовим випромінюванням. *The 3 rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects" (December 5-7, 2021)*. SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2021. С. 301-305.

53. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І. Вплив розмірів наважок води на обертовому столі мікрохвильової печі на тривалість їх випаровування. *The 3 rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects" (December 5-7, 2021)*. SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2021. С. 296-300.

54. **Солоненко Л.І.** Нагрівання та випаровування води з наважок в мікрохвильовій печі у присутності матеріалів різної природи. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28...29 квітня 2022р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 176-179.

55. **Солоненко Л.І.** Дослідження можливості структурування піщано-рідкоскляної суміші у мікрохвильовому випромінювання. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28...29 квітня 2022р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 171-172.

56. **Солоненко Л.І.**, Реп'ях С.І. Уявна енергія активації рідкого скла на плакованому піску в паромікро-хвильовому середовищі. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28...29 квітня 2022р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 164-170.

57. **Солоненко Л.І.** Досліджування спінювання рідкого скла під дією мікрохвильового випромінювання в структурованій піщано-рідкоскляній суміші. *XIV Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022: матеріали науково-технічної конференції, 28...29 квітня 2022р., м. Київ*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 173-175.

58. **Солоненко Л.І.** Структурування піщано-рідкоскляних сумішей мікрохвильовим випромінюванням. *Литво. Металургія. 2022: Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (4-6 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 127-131.

59. **Солоненко Л.І.** Нагрівання діелектричних матеріалів мікрохвильовим випромінюванням. *Литво. Металургія. 2022: Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (4-6 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*.

Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 131-135.

60. **Солоненко Л.І.** Спінювання силікату натрію плакованого кварцового піску в паро-мікрохвильовому середовищі. *Литво. Металургія. 2022: Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (4-6 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ)*. Харків, НТУ «ХПІ», 2022. С. 139-138.

## АНОТАЦІЯ

**Солоненко Л.І.** Теоретичні та технологічні основи паро-мікрохвильового структурування піщано-рідкоскляних сумішей для виготовлення виливків. – **Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – Ливарне виробництво. – Український державний університет науки і технологій МОН України, Дніпро, 2023.

У дисертації наведені теоретичні та технологічні узагальнення в рамках вирішення науково-технічної проблеми створення екологічно безпечних ливарних форм та стрижнів з піщано-рідкоскляної суміші, що структуровані за ПМЗ-процесом, для виливків загальномашинобудівного призначення, шляхом визначення закономірностей формування властивостей і кінетики структурування суміші, оптимізації її складу та реалізації результатів досліджень у виробництві, що зумовлює підвищення екологічної безпеки та санітарно-гігієнічних умов виробництва, скорочення циклу та енергоємності процесу виготовлення виливків, підвищення їх якості та, відповідно, зниження їх собівартості.

З використанням наважок різних матеріалів і різної маси дослідили особливості їх нагрівання в резонаторі мікрохвильових печей зі стоячою хвилею при частоті випромінювання 2,45 ГГц і номінальною потужністю магнітронів 700...1200 Вт. Встановлено, що з віддаленням від вісі обертового столу потужність мікрохвильового випромінювання зменшується з  $\chi=0,40...0,72$  до  $\chi=0,29...0,36$  від номінальної потужності магнетрону мікрохвильової печі. При цьому, при однаковій масі, швидкість підвищення температури матеріалів, що нагріваються прямо пропорційна їх відносній діелектричній проникності, яка (для мінералів) залежить виключно від їх хімічного складу, що треба враховувати під час вибору складу піщано-рідкоскляних сумішей, що структурують в паро-мікрохвильовому середовищі (за ПМЗ-процесом).

Досліджено кінетику структурування кварцового піску плакованого натрієвим рідким склом та структурованого за ПМЗ-процесом. Встановлено, що при використанні ПМЗ-процесу виділення води з структурованої суміші проходить в три етапи при  $\sim 100...128$  °С. При цьому, наявність рідкого скла в кварцовому піску та його низька уявна щільність суттєво знижують масу піщано-рідкоскляної суміші, яку можливо обробити фіксованою кількістю насиченої водяної пари, по відношенню до чистого кварцового піску, що пов'язано з процесами гідратації-дегідратації рідкого скла, його кількістю, відносною пористістю суміші та часом її нагрівання мікрохвильовим випромінюванням.

Симплекс-плануванням активного експерименту оптимізовано склад піщано-

рідкоскляної суміші за ПМЗ-процесом при раціональному рівні його основних технологічних параметрів. Використання отриманих результатів забезпечить структурованим піщано-рідкоскляним сумішам наступний рівень властивостей: міцність на стиск – 2,9...3,0 МПа, обсіпальність – 0,26...0,30 %, газопроникність – 150...155 од, газотвірна здатність – 3...5 см<sup>3</sup>/г, робота вибивання – 92...100 Дж, уявна щільність – 1720...1730 кг/м<sup>3</sup>, стріла прогину – 0,32 %, що відповідає сучасним вимогам до ливарних форм та стрижнів.

За отриманими даними розроблено функціональні залежності між обсіпальністю, крихкістю, міцністю, роботою вибивання виливків з форм і стрижнів з виливків і рядом параметрів і властивостей структурованих формувальних та стрижневих сумішей, які визначають на зразках за стандартними і загальноприйнятими методиками. Визначено інтегрально-ефективні величини теплофізичних параметрів кварцового піску, плакованого рідким склом в кількості від 0,5 до 3,0 % (за масою, понад 100 % піску) і структурованого за ПМЗ-процесом при заливці в нього алюмінієвого сплаву і сірого чавуну.

Встановлено, що характер механічного руйнування піщано-рідкоскляної суміші, структурованої за ПМЗ-процесом, не залежить від вмісту рідкого скла, яке пішло на плакування кварцового піску, але залежить від тривалості ПМЗ-процесу, зі збільшенням часу якого змінюється від адгезійного (до 2 хв) до змішаного (2...4 хв) і когезійного (понад 4 хв). Робота вибивання піщано-рідкоскляних сумішей структурованих за ПМЗ-процесом, що містять від 0,5 до 2,5 % (за масою, понад 100 % піску) рідкого скла, зі збільшенням температури їх попереднього нагріву від 800 до 1100 °С, знижується з 185...15 Дж до 0, а водостійкість близька до абсолютної за час дослідів, що дозволяє ці суміші легко видаляти з виливків ударно-вібраційними способами. Вибивання стрижнів, температура нагріву яких не перевищувала 600 °С, рекомендовано здійснювати шляхом занурення виливків у воду.

Досліджено кінетику карбонізації частково дегідратованого рідкого скла в тонкому шарі на повітрі, з якої витікає, що зі збільшенням відносної вологості повітря інтенсивність карбонізації рідкого скла та, відповідно, маса карбонату і гідрокарбонату, що утворилася в тонких плівках рідкого скла, зростають. Тому зберігання плакованого піску рекомендовано проводити в тарі, що герметично закривається, з використанням наважки їдкого натру.

Розроблено опис механізму масопереносу рідкого скла в пласкому капілярі під дією мікрохвильового випромінювання та розроблено рекомендації щодо спарювання форм та стрижнів з піщано-рідкоскляних структурованих сумішей шляхом їх склеювання рідким склом в мікрохвильовому випромінюванні.

Встановлено причини та розроблено опис механізмів виникнення дефектів вимоїна та внутрішня тріщина, які притаманні виключно ливарним формам та стрижням з піщано-рідкоскляної суміші, структурованої за ПМЗ-процесом.

Досліджено якість поверхні виливків, які отримано в піщано-рідкоскляних формах за ПМЗ-процесом. Встановлено, що їх пригар має термічний характер і, за винятком виливків з чавуну, є легковидаляємим. Ступінь точності поверхні таких виливків з бронзи, сталі та чавуну відповідає 7...10 класу, а алюмінієвих



сплавів – 5...14 класу відповідно до ДСТУ 8981:2020. Проведено аналіз якості виливків поточного виробництва та виливків, що виготовлені у формах з піщано-рідкоскляних сумішей, структурованих за ПМЗ-процесом.

**Ключові слова:** рідке скло, силікат натрію, кварцовий пісок, суміш, структурування, ПМЗ-процес, форма, стрижень, кінетика, мікрохвильове випромінювання, властивості, виливок

## SUMMARY

**Solonenko L.I. Theoretical and technological basis of sand-sodium-silicate mixtures steam-microwave structuring for making castings. – Qualification scientific work. – Manuscript.**

Dissertation on competition of doctor of technical sciences scientific degree with specialty 05.16.04 – Foundry production. – Ukrainian State University of Science and Technologies. Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2023.

Dissertation presents theoretical and technological generalizations in solving the scientific and technical problem of environmentally friendly molds and rods from sand-sodium-silicate mixture, structured by SMS-process, creating for castings of general engineering purposes, by properties formation regularities and kinetics of mixture structuring determining, its composition optimization and research results realization in production, which leads to environmental safety and production sanitary conditions increasing, cycle and energy consumption of casting process reducing, their quality improving and, accordingly, their cost lowering.

Using different materials samples with different masses, their heating peculiarities in microwave furnace resonator with standing wave at radiation frequency of 2.45 GHz and nominal magnetron power of 700...1200 W have been investigated. It has been established that with distancing from axis of rotating table microwave radiation power decreases from  $\chi=0.40...0.72$  to  $\chi=0.29...0.36$  of microwave furnace magnetron nominal power. In this case, at the same mass, temperature rising rate of heating materials is directly proportional to their relative dielectric permeability, which (for minerals) depends exclusively on their chemical composition. That must be taken into account when choosing the composition of sand-sodium-silicate mixtures structured by steam microwave environment (SMS-processing).-

Kinetics of quartz sand clad with sodium silicate solute and structured by SMS-process structuring has been studied. It has been established that when using SMS-process, water separation from structured mixture takes place in three stages at  $\sim 100...128$  °C. At the same time, sodium silicate solute presence in quartz sand and its low apparent density significantly reduce sand-sodium-silicate mixture mass, which can be treated with fixed amount of saturated water steam, relative to pure quartz sand, which is associated with sodium silicate solute hydration-dehydration, with its amount, with mixture relative porosity and its heating by microwave radiation time.

Sand-sodium-silicate mixture composition at SMS-process has been optimized by simplex planning of active experiment due to rational level of its main technological parameters. Implementation of obtained results will provide the structured sand-sodium-silicate mixtures with following level of properties: compres-

sive strength – 2.9...3.0 MPa, crushability – 0.26...0,30%, gas permeability – 150...155 units, gas-generating capacity – 3...5 cm<sup>3</sup>/g, knockout work – 92...100 J, imaginary density – 1720...1730 kg/m<sup>3</sup>, deflection beam – 0.3%, which meets modern requirements for molds and rods.

According to data obtained, functional dependences between crushability, brittleness, strength, castings knockout work from molds and rods and number of parameters and properties of structured mold and rod mixtures, which are determined on samples by standard and conventional methods, have been developed. Integral-effective values of thermo-physical parameters of quartz sand clad with sodium silicate solute in amount of 0,5 to 3,0% (by weight, over than 100% sand) and structured by SMS-process when pouring aluminum alloy and gray cast iron have been determined.

It has been established that sand-sodium-silicate mixture structured by SMS-process mechanical destruction nature does not depend on sodium silicate solute content, which has been consumed on quartz sand cladding, but depends on SMS-process duration, that is changes with time from adhesive (up to 2 min) to mixed (2...4 min) and to cohesive (more than 4 min). Knock out work of sand-sodium-silicate mixtures structured by SMS-process, containing sodium silicate solute from 0.5 to 2.5% (by weight, over 100% sand), with preheating temperature increasing from 800 to 1100 °C, decreases from 185...15 J to 0, and water resistance remains close to absolute during examination time, which allows these mixtures to be easily removed from castings by shock-vibration methods. It has been recommended to knock out the rods, which heating temperature did not exceed 600 °C, by immersing castings in water. Partially dehydrated sodium silicate solute in thin layer in air carbonization kinetics has been studied, from which it follows that with air relative humidity increasing sodium silicate solute carbonization intensity and, accordingly, mass of carbonate and bicarbonate formed in sodium silicate solute thin films increases. Therefore, it has been recommended to store clad sand in hermetically sealed container using caustic soda addition.

Mechanism of sodium silicate solute mass transfer in flat capillary under microwave radiation action description has been elaborated and recommendations for pairing molds and rods from sand-sodium-silicate structured mixtures by gluing them with sodium silicate solute in microwave radiation have been developed.

Reasons have been established and mechanisms description has been developed for leakage and internal cracks occurrence, which are inherent exclusively in foundry molds and cores made from sand-sodium-silicate mixtures structured by SMS-process.

Surface quality of castings obtained in sand-sodium-silicate molds by SMS-process has been studied. It has been established that their burn is thermal in nature and, with exception of cast iron castings, easily removed. Such bronze, steel and cast iron castings surface accuracy level corresponds to 7...10 classes, and aluminum alloys – 5...14 classes according to DSTU 8981:2020. Current production parts and castings made in molds from sand-sodium-silicate mixtures structured by SMS-process foundry quality analysis have been carried out.

**Keywords:** sodium silicate solute, sodium silicate, quartz sand, mixture, structuring, SMS-process, mold, rod, kinetics, microwave radiation, properties, casting