

# ТЕПЛОФІЗИЧНІ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ТВЕРДІННЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 29, 2021, № 2 (325), xx-xx

<https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>

УДК 621.742.52

**Л.І. Солоненко**<sup>1</sup>, канд. техн. наук., доц. каф. технології та управління ливарними процесами,  
e-mail: solonenkoli14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2029-8044>

**С.І. Реп'ях**<sup>2</sup>, д-р техн. наук., проф. каф. ливарне виробництво, e-mail: 123rs@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>

<sup>1</sup>Одеський національний політехнічний університет (Одеса, Україна)

<sup>2</sup>Національна металургійна академія України (Дніпро, Україна)

## Внутрішні тріщини у стрижнях, що структуровані в паро-мікрохвильовому середовищі

Метою дослідження є з'ясування механізму виникнення внутрішніх тріщин в ливарних формах та стрижнях, що виготовляють за процесом паро-мікрохвильового затвердіння (ПМЗ), з піску, що плакований рідким склом. У дослідженнях використовували кварцовий пісок марки 1К<sub>1</sub>О<sub>1</sub>02, який плакували содовим натрієвим рідким склом з величиною силікатного модуля 2,9 і питомою щільністю 1440 кг/м<sup>3</sup> при 20 °С. Дилатометричні вимірювання проводили в камері спеціально пристосованій для цього мікрохвильової печі з потужністю магнетрону 700 Вт і частотою 2,45 ГГц. Лінійну зміну висоти піску в ємності фіксували шляхом відеореєстрації показань індикатора годинникового типу у часі. Випробування пісків проводили як в середовищі мікрохвильового, так і паро-мікрохвильового випромінювання з попереднім просіюванням сухого плакованого піску через сито з осередком 0,4 мм і 0,63 мм. В статті представлено результати дилатометричних досліджень зміни розмірів зразків з чистого піску і піску, що плакований рідким склом, від часу їх обробки мікрохвильовим випромінюванням на повітрі і в середовищі водяної пари. Показано, що причиною появи внутрішніх тріщин в ливарних формах та стрижнях, які виготовляють за ПМЗ-процесом, є тимчасове припинення мікрохвильового впливу на суміш під час її структурування. В результаті цього через різницю у характері і величині зміни розмірів шарів структурованої і неструктурованої суміші в опоці (стрижневого ящику) на фронті структурування з'являється шар зі слабким механічним зв'язком між сусідніми піщинками, а згодом і внутрішня тріщина. Наукова новизна роботи полягає в з'ясуванні причин і механізму виникнення внутрішніх тріщин в ливарних формах і стрижнях, що виготовляють за процесом паро-мікрохвильового затвердіння з піску, що плакований рідким склом.

**Ключові слова:** стрижень, пісок, рідке скло, випромінювання, структурування, тріщина, водяна пара, манжета.

**Вступ.** При використанні сполучних матеріалів, розчинних у воді або поглинаючих воду, сушіння ливарних форм і стрижнів (ЛФС) зазвичай є обов'язковою технологічною операцією. Мета сушіння ЛФС – попередження появи в виливках газових раковин, засмічень, просікання і ужимин в результаті переходу води в пару в тілі форми і стрижня (Ф/С) при їх контакті з розплавом, що заливається в них, підвищення міцності ЛФС і т. п. [1, 2].

Сушіння – небажана технологічна операція у виробництві лиття, що збільшує як його собівартість, так і цикл виробництва литих деталей. При цьому, сушіння нерідко призводить до розтріскування поверхні ЛФС, до викривлення і підвищення обсипальності стрижнів тощо.

За характером сушіння поділяють на глибинне і поверхневе. Вид сушіння призначають, виходячи з

умов «роботи» ЛФС, товщини їх стінок та стінок вилівка, температури і фізико-хімічних особливостей розплаву, що заливають в них, і т. п. При глибинному сушінні ЛФС висихають на всю свою глибину, при поверхневому – на глибину 5–40 мм. Глибинне сушіння проводять при 200–400 °С протягом від 1 до 40 годин. У разі примусового прокачування гарячого газу через ЛФС тривалість глибинного сушіння скорочують до 0,5–8 годин. Поверхневе сушіння проводять переважно для великих ЛФС протягом 20–40 хвилин [3, 4].

Виготовлення піщано-рідкоскляних ЛФС способом паро-мікрохвильового затвердіння (ПМЗ) [5] виключає необхідність їх подальшого сушіння. Це обумовлено тим, що для виготовлення ЛФС за ПМЗ-процесом використовують плакований рідким склом (РС) кварцовий пісок, в якому після структурування залишковий масовий вміст води (вологи) не переви-

щує 0,1–0,5 % [6, 7]. Проте, як показала практика, при певних умовах виробництва стрижні, що виготовлені за ПМЗ-процесом, незважаючи на високу початкову міцність і зовнішню на вигляд цілісність, розламуються при маніпуляціях з ними або при складанні форми, або під дією динамічного удару рідкого металу об них, або в результаті дії на стрижень сили Архімеда.

Причина таких поломок – поява всередині тіла стрижня локальної зони більш низької міцності (внутрішньої тріщини). Виникає такий дефект у випадках проведення структурування суміші мікрохвильовим випромінюванням в переривчастому режимі. Незважаючи на очевидність заходів попередження появи подібних внутрішніх тріщин в стрижнях, механізм їх появи до теперішнього часу не встановлено.

**Постановка задачі.** Питаннями виготовлення [8, 9], сушіння [10, 11], процесами структурування [12, 13], визначення рівнів властивостей ЛФС [14, 15] займалися багато вчених і дослідників. Як результат, на сьогоднішній день накопичено величезний теоретичний і технологічний матеріал з питань формоутворення в ливарному виробництві. Спосіб ПМЗ піщано-рідкоскляних сумішей з технологічної точки зору з числа відомих способів структурування сумішей найменш досліджений, хоча і відноситься до числа екологічно безпечних, найбільш енергозберігаючих і перспективних способів виробництва ЛФС для дрібного і середнього лиття зі сплавів на основі заліза і легкоплавких кольорових сплавів. У зв'язку з цим, робота, спрямована на дослідження механізму виникнення внутрішніх тріщин в ЛФС, є актуальною.

**Мета роботи.** З'ясування механізму виникнення внутрішніх тріщин в ливарних формах і стрижнях, що

виготовляють за процесом паро-мікрохвильового затвердіння, з кварцового піску, який плаковано рідким склом.

**Об'єкт і методика досліджень.** Об'єкт досліджень – ливарні форми та стрижні, що виготовляють шляхом структурування піщано-рідкоскляних сумішей за способом паро-мікрохвильового затвердіння.

У дослідженнях використовували кварцовий пісок марки 1К<sub>1</sub>О<sub>1</sub>02 Вільногірського родовища, який плакували содовим натрієвим РС з величиною силікатного модуля 2,90–2,95 і питомою щільністю 1440–1450 кг/м<sup>3</sup> при 20 °С. Результати ситового аналізу, хімічний склад і деякі показники використаного в дослідженнях кварцового піску наведено в табл. 1, 2.

Для досліджень використовували кварцовий пісок, який плакували РС з розрахунку 1 % і 2,5 % РС за масою понад 100 % неплакованого піску. Перед використанням плакований пісок сушили в полі мікрохвильового випромінювання протягом 2–3 хвилин і охолоджували його на повітрі до 20–25 °С. Стрижні виготовляли шляхом укладання на дно стрижневого ящика поліуретанової губки, просоченої 1 г води, заповненням стрижневого ящика сухим плакованим піском, ущільненням піску вібрацією протягом 30–40 с на вібростолі з частотою коливань платформи 50 Гц і амплітудою 1 мм. Для структурування наповнений стрижневий ящик поміщали в мікрохвильову камеру з потужністю магнетрона 700 Вт і частотою 2,45 ГГц.

У дослідженнях виготовляли стрижні у вигляді багатогранного усіченого конуса з діаметром найбільшої підстави 110 мм (маса стрижня 2,4 кг), загальний вигляд якого, а також лінія розрізання стрижня для досліджень його структури представлені на рис. 1.

Таблиця 1

## Ситовий аналіз кварцового піску Вільногірського родовища

Залишок на сітці, %мас.									
1	04	0315	025	02	016	01	0063	005	-005
0,00	0,56	3,92	7,30	58,01	20,10	9,59	0,08	0,02	0,00
Середній розмір зерна, мм								0,23	
Коефіцієнт однорідності, %								85	
Модуль дрібноти за ГОСТ 23409.24-78								58,96	

Таблиця 2

## Хімічний склад та властивості кварцового піску Вільногірського родовища

SiO <sub>2</sub> , %мас.	Глиниста складова, %мас.	Домішки, %мас.	
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O+CaO+MgO
99,58	0,1	0,03	0,29
Газопроникність, од.	Втрата маси при прожарюванні, %	Вміст вологи, %мас.	pH, од.
227 ± 3	0,11 ± 0,01	0,02–0,03	7,0

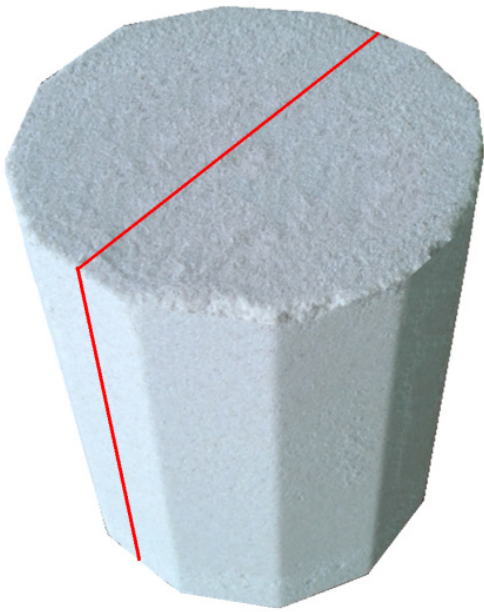


Рис. 1. Загальний вигляд стрижня, який виготовлений за ПМЗ-процесом, з лінією його розрізання

Тривалість обробки суміші мікрохвильовим випромінюванням при структуруванні за ПМЗ-процесом в усіх випадках становила 8 хвилин. Відповідно до плану досліджень переривання процесу мікрохвильового випромінювання здійснювали шляхом відключення магнетрона мікрохвильової печі на 60 с. Масу визначали на електронних вагах з похибкою 0,1 і 1 г, час реєстрували секундоміром з точністю 1 с.

Дилатометричні вимірювання проводили в камері при впливі на випробуваний зразок ( $\varnothing 30 \times 110$  мм) мікрохвильового випромінювання з використанням пристрою, схему якого представлено на рис. 2.

Лінійну зміну висоти піску в ємності, під час його обробки мікрохвильовим випромінюванням в пристосуванні фіксували за допомогою відеореєстрації індикатора годинного типу 1 (див. рис. 2) з точністю 0,01 мм з наступною побудовою залежностей віднос-

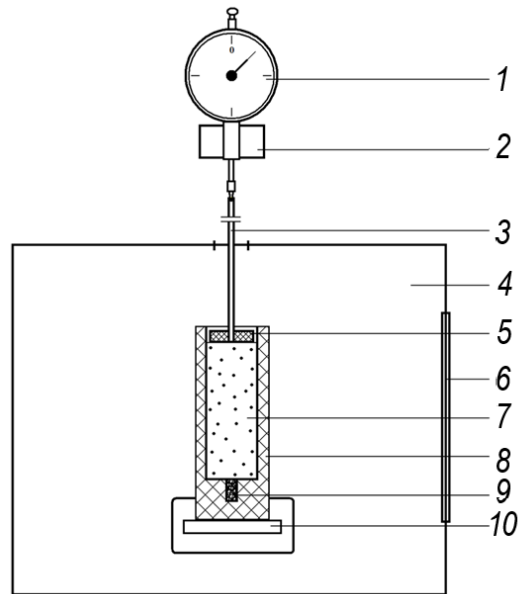


Рис. 2. Схема пристрою для визначення лінійного розширення піску залежно від тривалості його обробки мікрохвильовим випромінюванням: 1 – індикатор переміщення годинного типу; 2 – незалежне кріплення індикатора годинного типу; 3 – кварцова трубка; 4 – робоча камера мікрохвильової печі; 5 – гіпсова опорна пластина; 6 – вихідний отвір хвилеводу; 7 – зразок випробуваного піску; 8 – гіпсо-кварцова ємність; 9 – поліуретанова губка, яка просочена водою; 10 – незалежна опора

ного лінійного розширення піску від тривалості його нагрівання мікрохвильовим випромінюванням. Випробування пісків проводили як в середовищі мікрохвильового, так і паро-мікрохвильового випромінювання з попереднім просіванням сухого плакованого піску через сито з осередком 0,4 мм і 0,63 мм.

**Результати досліджень.** Візуальне дослідження структури стрижня, вихідна суміш якого була структурована за ПМЗ-процесом в переривчастому режимі мікрохвильового випромінювання, показало, що при такому режимі в стрижнях з'являється прошарок піску

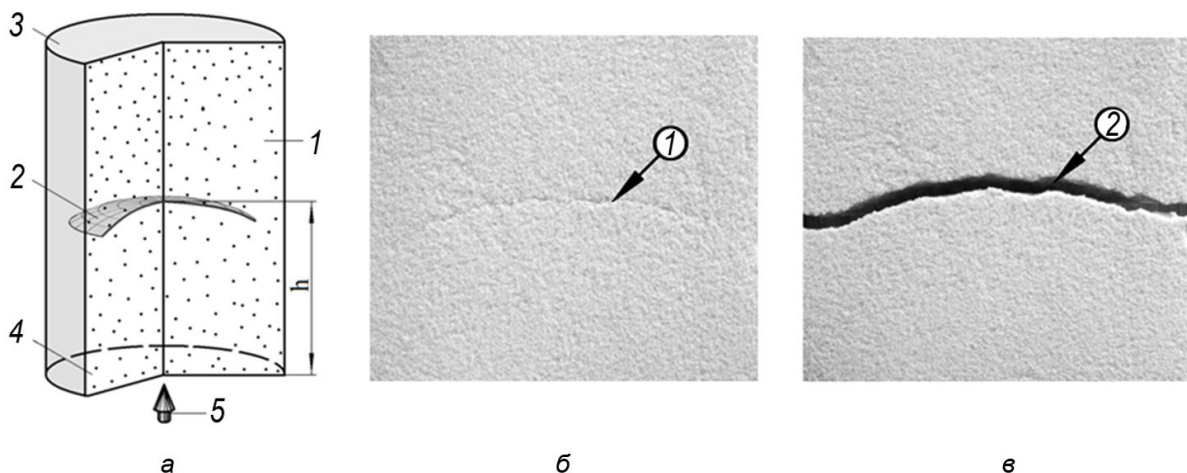
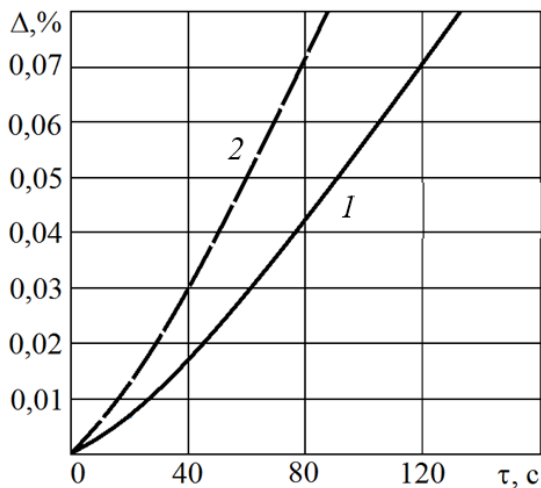


Рис. 3. Схема розташування внутрішньої тріщини в стрижні циліндричної форми, виготовленого за способом ПМЗ (а), вид внутрішньої тріщини в закритому (б) і розкритому (в) стані: 1 – внутрішня поверхня стрижня; 2 – внутрішня тріщина; 3 – вільна поверхня стрижня; 4 – нижній торець стрижня; 5 – напрямок руху водяної пари при обробці суміші мікрохвильовим випромінюванням; ① – внутрішня тріщина в стрижні; ② – вид внутрішньої тріщини після руйнування стрижня



**Рис. 4.** Залежності відносного лінійного розширення сухого кварцового піску (1) і сухого кварцового піску в середовищі водяної пари (2) від часу впливу мікрохвильового випромінювання

з ослабленими міжзерновими зв'язками (внутрішня тріщина), що схематично представлено на рис. 3, а.

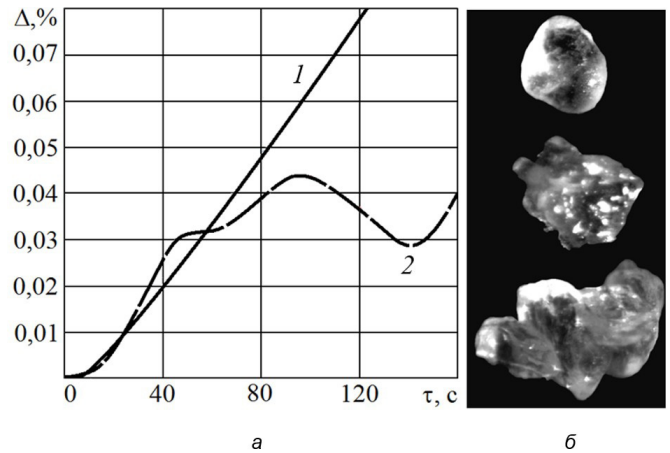
Тобто, внутрішня тріщина в тілі незруйнованого стрижня являє собою шар слабопов'язаних між собою піщинок товщиною в 1–2 піщинки, який не має виходу на поверхню стрижня і розташовується перпендикулярно напрямку руху фронту структурування суміші, що схематично представлено на рис. 3, а. На рис. 3, б і рис. 3, в, відповідно, представлений вид такого шару (внутрішньої тріщини) на поздовжньому (поздовжньою осі стрижня) розрізі піщаного стрижня і та ж тріщина після руйнування стрижня.

Для встановлення механізму виникнення внутрішніх тріщин визначали відносно лінійне розширення сухого піску і сухого плакованого піску з 1 % і 2,5 % РС при його нагріванні в полі мікрохвильового випромінювання і в паро-мікрохвильовому середовищі.

Результати дилатометричних вимірювань неплакованого кварцового піску при мікрохвильовій та паро-мікрохвильовій обробці у вигляді відповідних залежностей представлено на рис. 4.

З аналізу ходу залежностей на рис. 4 випливає, що величина зміни відносного лінійного розширення сухого кварцового піску за час випробувань менше, ніж його відносно лінійне розширення в паро-мікрохвильовому середовищі. Ця закономірність пояснюється тим, що діелектрична проникність кварцового піску ( $\epsilon = 3,5 \dots 3,7$ ) в  $\sim 23$  рази менше діелектричної проникності води. З цієї причини, в паро-мікрохвильовому середовищі водяна пара, конденсуючись на поверхні піщинок, віддає їм своє тепло і надалі повторно випаровується, нагріваючись в результаті дії на конденсат мікрохвильового випромінювання. Все це інтенсифікує процес нагріву піску і, відповідно, збільшує величину його лінійного розширення в часі в порівнянні з піском, що нагрівається мікрохвильовим випромінюванням в повітряному середовищі.

Залежності відносного лінійного розширення сухого кварцового піску, плакованого 1 % РС і просіяного через сито з осередком 0,4 мм, в середовищі повітря



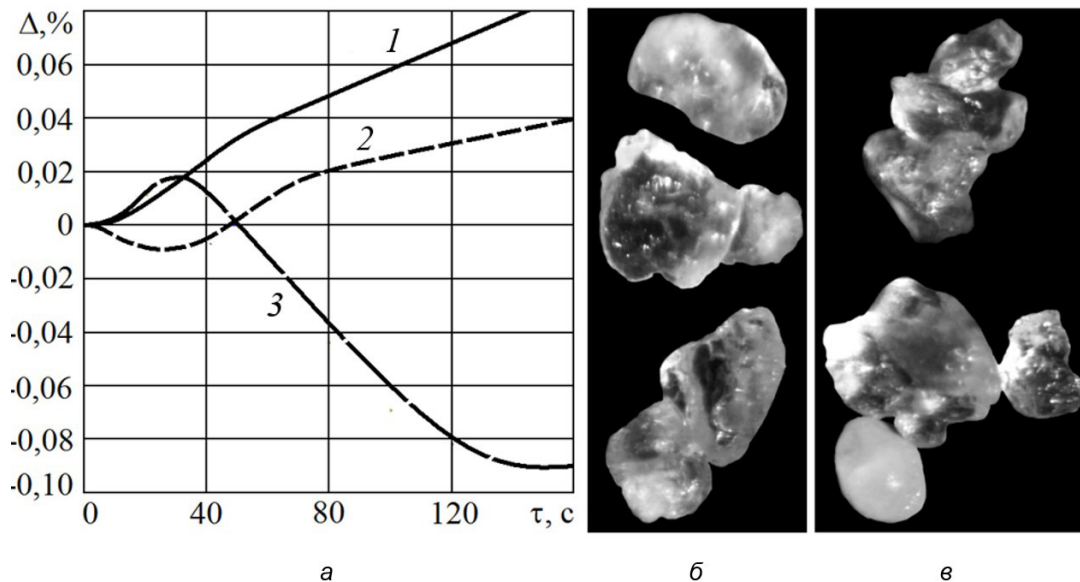
**Рис. 5.** Залежності відносного лінійного розширення сухого кварцового піску, який плаковано 1 % РС, в середовищі повітря (1) та водяної пари (2) від часу його обробки мікрохвильовим випромінюванням (а), вид піщинки і конгломератів піщинок, плакованих 1 % РС і просіяних через сито з осередком 0,4 мм (б)

та водяної пари від часу впливу мікрохвильового випромінювання представлено на рис. 5, а.

З аналізу ходу залежностей на рис. 5, а випливає, що сухий плакований пісок в полі мікрохвильового впливу в повітряному середовищі розширюється подібно чистому кварцовому піску в тому ж середовищі (див. рис. 4), але дещо з більшою інтенсивністю. Більш інтенсивне нагрівання плакованого піску в даному випадку викликано наявністю на його поверхні шару силікату натрію (висушеного РС), який характеризується більшою величиною діелектричної проникності і, отже, більш високою інтенсивністю нагрівання мікрохвильовим випромінюванням [7].

Плакований кварцовий пісок в середовищі водяної пари (див. крива 2 на рис. 5, а) починає розширюватися тільки з 12 секунди мікрохвильового впливу, і його постійне розширення триває до  $\sim 47$  с. Подальше нагрівання призводить не тільки до припинення збільшення, але і до деякого зниження висоти піску в зразку. Певне, ця зміна висоти зразка обумовлена його ущільненням. Справа в тому, що випробуваний плакований пісок являє собою суміш, як окремих зерен, так і їх конгломератів, і осколків конгломератів (див. рис. 5, б). У середовищі водяної пари спочатку сухі манжети конгломератів при насиченні водою з конденсату переходять в рідкий стан, в результаті чого пов'язані ними зерна піску отримують можливість переміщатися відносно один одного. Таке переміщення (ущільнення) під власною вагою, підвищуючи уявну щільність суміші, не дивлячись на неухильне підвищення температури піщинок, і призводить до тимчасового зменшення висоти зразка.

Залежності відносного лінійного розширення сухого кварцового піску, плакованого 2,5 % мас. РС в повітряному середовищі, сухого кварцового піску, плакованого 2,5 % мас. РС і просіяного через сито з осередком 0,4 мм в середовищі водяної пари, а також сухого кварцового піску, плакованого 2,5 % мас. РС і просіяного через сито з осередком 0,63 мм в середовищі водяної пари, від часу впливу мікрохвильового випромінювання представлені на рис. 6, а.



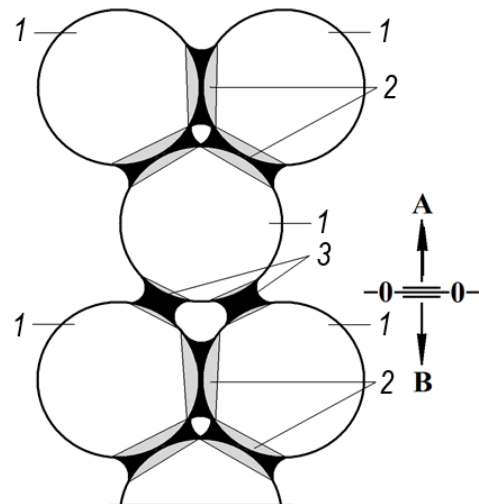
**Рис. 6.** Залежності відносного лінійного розширення сухого кварцового піску, плакованого 2,5 % РС в повітряному середовищі (1), сухого кварцового піску, плакованого 2,5 % РС і просіяного через сито з осередком 0,4 мм (2) та 0,63 мм (3) в середовищі водяної пари від часу впливу мікрохвильового випромінювання (а), вид конгломератів піщинок сухого кварцового піску, плакованого 2,5 % РС і просіяного через сито з осередком 0,4 (б) і 0,63 (в) мм

З аналізу ходу залежностей на рис. 6, а випливає, що сухий пісок, плакований 2,5 % РС (крива 1 на рис. 6, а) в повітряному середовищі, в полі мікрохвильового випромінювання розширюється подібно чистому кварцовому піску в повітряному середовищі (див. крива 1 на рис. 4) і плакованому кварцовому піску 1 % РС в повітряному середовищі (див. крива 1 на рис. 5, а). Однак кварцовий пісок, плакований 2,5 % РС, розширюється інтенсивніше, ніж пісок з 1 % РС. В даному випадку це обумовлено як більш високою діелектричною проникністю силікату натрію по відношенню до кварцового піску, так і його більшим вмістом у піску.

Хід кривих 2 і 3 на рис. 6, а кардинально відрізняється від ходу кривої 1. Як і в попередньому зразку (див. крива 2 на рис. 5, а) це пов'язано не тільки з наявністю в суміші окремих піщинок (див. рис. 6, б), але і їх конгломератів. При цьому як піщинки, так і їх конгломерати у цих сумішах покриті товстим шаром силікату натрію, що і є причиною такої зміни характеру в розширенні випробуваного зразка суміші в часі.

Відносна лінійна зміна висоти піску, плакованого 2,5 % РС і просіяного через сито з осередком 0,63 мм (див. крива 3 на рис. 6, а), з 35 с нагріву зразка носить стійкий від'ємний характер. Тобто в процесі структурування обсяг суміші зменшується, отже, підвищується її уявна щільність. Певно, як і в описаному вище випадку, це пов'язано з тим, що дана суміш практично повністю складається з великих і не завжди компактних за формою конгломератів піщинок, які покриті товстим шаром силікату натрію (див. рис. 6, в). Як результат, в процесі структурування в паро-мікрохвильовому середовищі в такій суміші локальні переміщення піщинок проходять на відносно більші відстані, що і зумовлює характер і величину зміни висоти зразка суміші при її структуруванні.

**Обговорення результатів.** Виходячи з викладеного вище, а також використовуючи схему на рис. 7,



**Рис. 7.** Схема структури суміші, що структурована за ПМЗ-процесом, в області внутрішньої тріщини: 1 – піщинка кварцового піску; 2 – манжета, що утворилася при безперервному характері впливу мікрохвильового випромінювання; 3 – манжета в області внутрішньої тріщини, що утворилася при переривчастому характері впливу мікрохвильового випромінювання, O-A – напрямок руху фронту структурування

механізм виникнення внутрішніх тріщин в ЛФС можна представити таким чином.

Структурування плакованого кварцового піску за ПМЗ-процесом передбачає надходження водяної пари з водяного заряду (просоченої водою поліуретанової губки і т. п.), розташованого в робочій порожнині стрижневого ящика (опоки), яке реалізується виключно під час обробки структурованої суміші мікрохвильовим випромінюванням. При цьому, водяна пара надходить в капілярні канали піску не миттєво, а послідовно їх заповнюючи, що і зумовлює наявність візуально чітко визначеного фронту структурування у

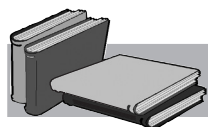
суміші. Така послідовність надходження водяної пари в суміш, що структурується, зумовлює і послідовність структурування суміші – тобто неодноразовість проходження цих процесів в різних частинах ЛФС.

Якщо під час мікрохвильової обробки відбудеться тимчасове припинення мікрохвильового випромінювання, то відмінність в характері або швидкості зміни розширення суміші над (напрямок 0-А на рис. 7) і під (напрямок 0-В на рис. 7) фронтом структурування (див. лінію 0-0 на рис. 7) буде реалізовано у вигляді збільшення відстані між сусідніми зернами піску в напрямку, паралельному напрямку переміщення фронту структурування суміші. Подальший вплив мікрохвильового випромінювання приведе до того, що на фронті структурування між сусідніми піщинками формуються манжети силікату натрію, які характеризуються більшою довжиною і, відповідно, меншою міцністю. Надалі саме в цій області виникає внутрішня тріщина, яка веде до руйнування ЛФС у вказаних вище випадках.

випромінюванням і з відмінностями у величині і характері зміни лінійних розмірів структурованої і неструктурованої частини суміші в ЛФС. Для попередження появи внутрішніх тріщин в ЛФС структурування їх піщано-рідкоскляних сумішей за ПМЗ-процесом слід проводити при неперервному режимі їх обробки мікрохвильовим випромінюванням. Для забезпечення безперервності режиму обробки сумішей ЛФС необхідно знати величину мінімального часу їх обробки. При цьому необхідно враховувати параметри структурованої суміші і властивості оснащення, що використовується, масу, кількість і особливості розташування в оснащенні водяних зарядів, конфігурацію ЛФС і технологічні можливості установки мікрохвильового випромінювання. На сьогоднішній день такі дані відсутні. У зв'язку з цим перспективою подальших досліджень є встановлення зазначених вище залежностей і на їх основі розробка відповідних технологічних рекомендацій та технологій з виготовлення ЛФС за ПМЗ-процесом.

### Висновки і перспективи досліджень

Поява внутрішньої тріщини в ЛФС, які структуровані за ПМЗ-процесом, викликана тимчасовим припиненням процесу обробки суміші мікрохвильовим

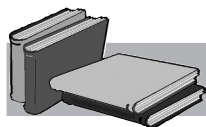


## ЛІТЕРАТУРА

1. Крутилин А.Н., Гуминский Ю.Ю., Русевич О.А. Повышение эффективности использования жидкостекляных смесей. Ч. 4. Комбинированное упрочнение. *Литейное производство*. 2018. № 4 (93). С. 38–44. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-38-44>
2. Белобров Е.А., Карпенкова О.Л., Белобров Л.Е., Белобров Е.Л. Вспомним забытые технологии: песчано-глинистые технологии для изготовления отливок в сухих формах. *Литье Украины*. 2015. № 2 (184). С. 12–17.
3. Белобров Е.А., Карпенкова О.Л., Белобров Л.Е., Белобров Е.Л. Вспомним забытые технологии: отверждение форм и стержней из жидкостекляных смесей теплом в камерных сушилах. *Литье Украины*. 2016. № 3 (187). С. 18–23.
4. Белобров Е.А., Карпенкова О.Л., Белобров Л.Е., Белобров Е.Л. Вспомним забытые технологии: формы из жидкостекляных смесей, отверждаемые на воздухе и при помощи переносных колпаковых газовых или электровентиляторных сушил. *Литье Украины*. 2016. № 2 (186). С. 20–22.
5. Пат. України 122538, МПК В22С 9/12, 9/10. Спосіб виготовлення ливарних форм і стрижнів з рідкоскляної суміші / Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., № а201901350; заявл. 11.02.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22, 7 с.
6. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Узлов К.І. Кінетика структурування піщано-рідкоскляних сумішей паро-мікрохвильовим затвердінням. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 4. С. 50–60. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.07>
7. 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 Natsionalnogo Hirnichogo Universytetu*. 2020. № 2. P. 37–41. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/037>
8. Бречко А.А., Великанов Г.Ф. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами. Л.: Машиностроение, 1982. 216 с.
9. Жуковский С.С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справочник. М.: Машиностроение, 2010. 256 с.
10. Солоненко Л.І. Некоторые особенности сушки литейных форм и стержней в области стоячих волн сверхвысокочастотного излучения. *Метал та лиття України*. 2020. № 1. С. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.01.069>
11. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
12. Ткаченко С.С., Колодий Г.А., Знаменский Л.Г., Ермоленко А.А. Холоднотвердеющие смеси на неорганическом связующем: состояние и перспектива развития (неорганика против органики). *Литейное производство*. 2018. № 2. С. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-2-16-22>
13. Фиговский О.Л., Кудрявцев П.Г. Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых наноконпозиционных материалов. *Инженерный вестник Дона*. 2014. № 2. С. 1–42.

14. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Дерябин Д.А., Хренов И.Б. Исследование свойств огнеупорного наполнителя холодно-твердеющих смесей. *Теория и технология металлургического производства*. 2016. № 1. С. 47–51.
15. Ключкина Т.Д., Власова К.А., Леонов К.А., Яшина С.А. Изучение механизма образования прочности в самотвердеющих смесях с фенольным связующим (обзор). *Труды ВИАМ*. 2018. № 3. С. 18–27.

Надійшла 10.01.2021



## REFERENCES

1. Krutilin, A.N., Guminsky, Yu.Yu., Rusevich, O.A. (2018). Improving the efficiency of using liquid glass mixtures. Part 4. Combined hardening. *Foundry*, no. 4 (93), pp. 38–44, doi: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-38-44> [in Russian].
2. Belobrov, E.A., Karpenkova, O.L., Belobrov, L.E., Belobrov, E.L. (2015). Let's recall the forgotten technologies: sandy-clay technologies for the manufacture of castings in dry molds. *Casting of Ukraine*, no. 2 (184), pp. 12–17 [in Russian].
3. Belobrov, E.A., Karpenkova, O.L., Belobrov, L.E., Belobrov, E.L. (2016). Let's recall the forgotten technologies: curing of molds and cores from liquid glass mixtures with heat in chamber dryers. *Casting of Ukraine*, no. 3 (187), pp. 18–23 [in Russian].
4. Belobrov, E.A., Karpenkova, O.L., Belobrov, L.E., Belobrov, E.L. (2016). Let's recall the forgotten technologies: molds made of liquid glass mixtures, cured in air and with the help of portable hood gas or electric fan dryers. *Casting of Ukraine*, no. 2 (186), pp. 20–22 [in Russian].
5. Pat. 122538 Ukraine, IPC B22C 9/12, 9/10. A method of manufacturing molds and rods from a liquid glass mixture, Solonenko L.I., Rep'yakh S.I., no. a201901350; declared 02/11/2019; publ. 25.11.2020, Bul. no. 22, 7 p. [in Ukrainian].
6. Solonenko, L.I., Rep'yakh, S.I., Uzlov, K.I. (2019). Kinetics of the structure of the food-and-gravel sums of steam-microchilles hardened. *Theory and practice of metallurgy*, no. 4, pp. 50–60, doi: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.07> [in Ukrainian].
7. Solonenko, L.I., Bilyi, O.P., Repiakh, S.I., Kimstach, T.V., Uzlov, K.I. (2020). Heating rate of granular inorganic materials by microwave radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnogo Hirnichogo Universytetu*, no. 2, pp. 37–41, doi: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/037>
8. Brechko, A.A., Velikanov, G.F. (1982). Molding and core mixtures with desired properties. L.: Mashinostroenie, 216 p. [in Russian].
9. Zhukovsky, S.S. (2010). Cold-hardening binders and mixtures for casting cores and molds: a reference book. Moscow: Mashinostroenie, 256 p. [in Russian].
10. Solonenko, L.I. (2020). Some features of drying casting molds and cores in the field of standing waves of microwave radiation. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 1, pp. 69–78, doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.01.069> [in Russian].
11. Lykov, A.V. (1968). Drying theory. Moscow: Energiya, 472 p. [in Russian].
12. Tkachenko, S.S., Kolodiy, G.A., Znamenskiy, L.G., Ermolenko, A.A. (2018). Cold-hardening mixtures on an inorganic binder: state and development prospects (inorganic versus border). *Foundry*, no. 2, pp. 16–22, doi: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-2-16-22> [in Russian].
13. Figovskiy, O.L., Kudryavtsev, P.G. (2014). Liquid glass and aqueous solutions of silicates as a promising basis for technological processes for obtaining new nanocomposite materials. *Don's Engineering Bulletin*, no. 2, pp. 1–42 [in Russian].
14. Vdovin, K.N., Feoktistov, N.A., Deryabin, D.A., Khrenov, I.B. (2016). Study of the properties of refractory filler of cold-hardening mixtures. *Theory and technology of metallurgical production*, no. 1, pp. 47–51 [in Russian].
15. Klyukvina, T.D., Vlasova, K.A., Leonov, K.A., Yashina, S.A. (2018). Study of the mechanism of strength formation in self-hardening mixtures with a phenolic binder (review). *Proceedings of VIAM*, no. 3, pp. 18–27 [in Russian].

Received 10.01.2021

**Summary**

**L.I. Solonenko**<sup>1</sup>, PhD (Engin.), Associate Professor at the Department of Technology and Management of Foundry Processes,  
e-mail: solonenkoli14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2029-8044>  
**S.I. Repyakh**<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Engin.), Professor at the Department of Foundry,  
e-mail: 123rs@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>

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

<sup>2</sup>*National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine)*

**Internal cracks in rods, structured in a steam microwave environment**

*The aim of the study is to elucidate the mechanism of the occurrence of internal cracks in casting molds and rods, structured by the process of steam-microwave hardening (SMH), with sand clad with water glass. The studies used quartz sand of grade 1K<sub>1</sub>O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>, which was clad with soda sodium water glass with a silicate modulus of 2.9 and a specific density of 1440 kg/m<sup>3</sup> at 20 °C. Dilatometric measurements were carried out in a chamber of a specially adapted microwave oven with a magnetron power of 700 W and a frequency of 2.45 GHz. The linear change in the height of the sand in the container was recorded by video recording of the readings of the dial indicator in time. The sands were tested in both microwave and steam-microwave radiation with the previous sifting of dry clad sand through a sieve with a mesh of 0.4 mm and 0.63 mm. The article presents the results of dilatometric studies of changes in the size of samples from pure sand and sand clad with liquid glass, during their processing by microwave radiation in air and in a water vapor environment. It is shown that the reason for the appearance of internal cracks in casting molds and cores, which are made by the SMH-process, is the temporary cessation of microwave action on the mixture during its structuring. As a result, due to the difference in the nature and magnitude of the change in the size of the structured and unstructured mixture in the flask (core box), a layer with a weak mechanical bond between adjacent grains of sand appears at the structuring front, and, as a result, an internal crack. The scientific novelty of the work lies in the elucidation of the causes and mechanism of the occurrence of internal cracks in casting molds and rods, structured by the SMH-process with sand clad with liquid glass.*

**Keywords**

*Rod, sand, liquid glass, radiation, structuring, crack, water vapor, cuff.*