

Л.І. Солоненко¹, д-р техн. наук., доц., доц. каф. цивільної безпеки та охорони праці, e-mail: solonenkoli14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

С.І. Реп'ях², д-р техн. наук., ст. дослідник, проф. каф. ливарного виробництва, e-mail: 123rs@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>

М.І. Замятін¹, канд. техн. наук, доц. каф. матеріалознавства та інженерії матеріалів, e-mail: zamyatinnikiv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8458-6341>

О.П. Білий², канд. техн. наук, доц., проф. каф. ливарного виробництва, e-mail: baplitvo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1234-5404>

І.А. Костенко¹, аспірант каф. цифрових технологій в інжинірингу, e-mail: avianazemnoe@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-1566-3674>

¹Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

²Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

Газонасиченість води як важіль керованості рівнем властивостей заморожених ливарних форм

Мета роботи — підвищити живучість піщано-глинистих форм, що заморожують в оснащенні, без використання скраплених газів.

В дослідженнях були використані пісок кварцовий $1K_3O_3O16$, бентонітова глина $BC2T_2$, каолінова глина $KC2T_2$, водопровідна вода, газувана вода та вода дегазована (кип'ячена). Визначення обсипальності проводили за методикою ГОСТ 23409.9, міцності на стиск — ГОСТ 23409.7, газопроникності — ГОСТ 29234.11.

Для досягнення заданого рівня основних параметрів заморожених при $-15\text{ }^\circ\text{C}$ піщано-глинистих сумішей з одночасним підвищенням живучості заморожених ливарних форм та стрижнів до ~ 18 хв найбільш доцільним є використання у суміші 5 % бентонітової глини марки $BC2T_2$ і 5 % дегазованої (кип'яченої) води з активацією глини у такій воді в складі суміші впродовж 24 годин. В той же час використання у складі сумішей каолінової глини марки $KC2T_2$ недоцільно, оскільки суміші з такою глиною не відповідають вимогам щодо формувальних та стрижневих сумішей.

Формувальні суміші, що складаються виключно з піску і води, непридатні для виготовлення ливарних форм та стрижнів у зв'язку з високою обсипальністю. Для підвищення міцності і зниження обсипальності для виробництва заморожених форм та стрижнів потрібно використовувати суміші піску, води і глини. Додаток до піску з водою бентонітової ($BC2T_2$) або каолінової ($KC2T_2$) глини призводить до зменшення обсипальності заморожених сумішей та підвищенню їх міцності. Заморожені при $-15\text{ }^\circ\text{C}$ суміші з вмістом каолінової глини до 7 % (за масою) та 5 % (за масою) водопровідної води характеризуються підвищеною обсипальністю, що унеможлиблює їх використання в якості формувальної або стрижневої суміші. При додаванні у кварцовий пісок 5 % набряклої дегазованою водою бентонітової глини $BC2T_2$, обсипальність замороженої суміші стає меншою за 0,1 %, газопроникність досягає 129 од., а міцність на стиск перевищує 4,0 МПа, що відповідає вимогам щодо формувальних та стрижневих сумішей. Газонасиченість води є потужним важелем в системі керованості рівнем властивостей заморожених ливарних форм, до складу яких входить кварцовий пісок та набрякла бентонітова глина.

Ключові слова: суміш, форма, вода, газ, розчинність, живучість, міцність.

Вступ. Відходи ливарного виробництва, газові та пилові викиди в атмосферу, «хімізація» технологічних процесів виробництва лиття становлять серйозну загрозу навколишньому середовищу, зокрема, токсичними речовинами, які потрапляють у повітряне середовище, підземні та стічні води, відвали [1]. Виходячи з того, що на сьогодні будь-яка нова розробка або удосконалення існуючих ливарних технологій та обладнання передбачає вирішення питань не тільки з підвищення продуктивності виробництва, покращення якості виливків, зниження собівартості литва, але і поліпшення умов праці та підвищення рівня екологічних показників виробництва, в останній час у виробництві литва все більше застосовують відомі екологічно та санітарно-гігієнічно безпечні формувальні та стрижневі суміші, в числі яких: піщано-глинисті, піщано-рідкоскляні, гіпсові, кремнезольні та ін. [2]. При цьому основні вимоги до таких сумішей залишаються незмінними, зокрема: межа міцності на стиск $\geq 1,0$ МПа, обсипальність $\leq 0,2...0,3$ %, газопроникність ≥ 90 од.

З точки зору рівня безпеки, собівартості, регенерації піску, великотоннажності виробництва, походження компонентів і податливості, з перелічених вище сумішей найбільш переважними є піщано-глинисті суміші. Однак суттєвими недоліками піщано-глинистих форм є їх низька міцність і жорсткість, невисока газопроникність та підвищена газотвірна здатність [3], що підвищує можливість виникнення дефектів виливків та знижує їх розмірну точність.

Одним із способів підвищення міцності та жорсткості піщано-глинистих форм є їх заморожування та використання, крім піску та води у складі сумішей, глини. Тобто у заморожених сумішах основним сполучним компонентом є присутня в них вода, яка між частинками піску при заморожуванні суміші формує тверді манжети, структуруючи цим суміш.

На сьогоднішній день дослідження властивостей заморожених піщано-водяних та інших подібних сумішей з точки зору їх використання у ливарному виробництві при виготовленні ливарних форм та стрижнів є обмеженими та фрагментарними. Зокрема, Грузман В.М. (1983) визначив механічні та теплофізичні властивості піщано-водяних заморожених сумішей, їх фільтраційні характеристики, показав неможливість підвищення швидкості затвердіння виливків у ливарних формах, виготовлених з заморожених піщано-водяних сумішей тощо. Авторами робіт [4, 5] доведено, що міцність замороженої суміші зростає як зі зниженням її температури, так і з підвищенням вмісту у суміші води та зменшення частки глини.

З метою прискорення часу заморожування піщано-водних сумішей автори роботи [6] використовують поєднання криогенних методів формування з контролем часу і місця, що створює наднизькі температури у ливарній формі. В роботі [7] автори охолоджують пісок при контакті з рідиною, яка охолоджує, після чого змішують з вологою суспензією і сумішшю. Авторами роботи [8] охолоджують воду до замерзання, щонайменше частково, перед або під час процесу формування ливарної форми. Для підвищення міц-

ності та поверхневої твердості замороженої ливарної форми та стрижнів автори роботи [9] додатково додають до суміші амідні, вуглецеві та поліефірні волокна довжиною 1...4 мм.

Технічна та екологічна привабливість процесу отримання виливків у заморожених формах сприяла появі різноманітних технологій, де заморожена вода є основним сполучним матеріалом [10, 11]. Зокрема, процес безконтейнерного лиття із замороженого піску пропонують в роботі [12]. В роботі [13] автори ливарну форму виготовляють шляхом механічного вирізання із замороженої піщано-водяної суміші за допомогою 3D-фрезерного верстата або подібного обладнання. Робота [14] присвячена розробці антипригарних фарбових композицій для форм із заморожених сумішей. Дорошенко В.С. у своїх роботах досліджує можливості та способи виготовлення кварцових піщаних форм за моделями виливків із льоду [15, 16], автори роботи [17] пропонують для реалізації такої технології використовувати льодяні моделі з суміші води та гранул пінополістиролу тощо.

Загальним найбільш суттєвим недоліком будь-яких відомих заморожених форм є їх обмежений час живучості, який зазвичай не перевищує 4...5 хв. На сьогодні підвищення живучості заморожених форм (підвищення міцності та зниження обсипальності) досягають шляхом збільшення в суміші вмісту глини, води або шляхом зниження початкової температури заморожених форм [18]. Однак зі збільшенням води і глини в суміші істотно підвищується її газоутворювальна здатність і зменшується газопроникність. Зниження температури замороженої форми, крім збільшення ймовірності обмороження працівників і збільшення ризику їхніх застудних захворювань, пов'язане зі значними енергетичними витратами або з необхідністю використання для заморожування скраплених газів, зокрема, азоту, що також має свої суттєві економічні та технологічні недоліки.

Відомо, що за винятком водню, гелію та неону у льоду інші гази практично не розчиняються. У той же час, припустивши, що в 1 літрі водопровідної (артезіанської) води при 20 °С в середньому розчинено ~6 мл O_2 , ~11 мл N_2 і ~13 мл CO_2 , при 100 °С вміст кисню, азоту і вуглекислого газу у воді практично дорівнює нулю, а у воді, яка газована CO_2 і знаходиться під атмосферним тиском при 20 °С, розчинено ~6 мл O_2 , ~11 мл N_2 і ~873 мл CO_2 , то загальний середній вміст кисню, азоту і вуглекислого газу в 1 кг льоду та в 1 л будь-якої кип'яченої води практично дорівнює нулю, у водопровідній воді при 20 °С — 30 мл/л та при 20 °С у газованій воді — 890 мл/л.

Природно, що під час кристалізації води у процесі заморожування піщано-глинистих сумішей, ця обставина повинна певним чином впливати на властивості заморожених ливарних форм і сумішей, оскільки розчинені у воді гази виділяються в льоді у вигляді газових бульбашок. Проте, у відомих відомостях по заморожених сумішах дані про вплив газонасиченості води на їх живучість та властивості відсутні.

Таким чином, на сьогодні завдання підвищення живучості заморожених піщано-глинистих ливарних

форм без використання будь-яких додаткових технологічних добавок і/або зниження їхньої початкової температури, зокрема, шляхом зміни газонасиченості води у заморожених сумішах, залишається невирішеним і, відповідно, актуальним.

Мета роботи — підвищити живучість піщано-глинистих форм, що заморожують в оснащенні, без використання скраплених газів.

Постановка задачі. Дослідити вплив газонасиченості води в піщано-глинистій суміші для ливарних форм та стрижнів на їх живучість, міцність, обсипальність та газотвірність і на основі отриманих експериментальних даних встановити функціональну залежність між цими показниками.

Об'єкт і предмет досліджень. Об'єкт досліджень — живучість на повітрі з температурою 20...25 °С заморожених при температурі -15 ± 1 °С піщано-глинистих сумішей. Предмет досліджень – живучість, міцність, обсипальність та газотвірність заморожених при температурі -15 °С піщано-глинистих сумішей.

Методи та методика досліджень. В дослідженнях були використані наступні матеріали: пісок кварцовий 1К₃О₃016; бентонітова глина БС2Т₂; каолінова глина КС2Т₂; водопровідна вода; вода газована; вода дегазована (кип'ячена).

Виготовлення сумішей проводили в лабораторних каткових бігунах шляхом змішування відповідних наважок їх компонентів впродовж 5...10 хв.

В дослідженнях використовували циліндричні зразки сумішей з розмірами Ø50×50 мм, які ущільнювали трьома ударами на лабораторному копрі та впродовж 24 годин витримували при температурі -15 ± 1 °С. Визначення обсипальності проводили за методикою ГОСТ 23409.9, міцності на стиск — ГОСТ 23409.7, газопроникності — ГОСТ 29234.11. Час витримки заморожених зразків до початку їх іспитів не перевищував 30 с. Час реєстрували за годинником з точністю 1 хв і за секундоміром з точністю 1 с. Для визначення маси використовували електронні ваги із точністю 0,01 г. Температуру реєстрували спиртовим термометром з точністю 1 °С.

Перед визначенням газопроникності, з метою зниження інтенсивності нагрівання зразка суміші на повітрі, після встановлення об'єктами зі зразком суміші на прилад на об'єму встановлювали пінопластовий стакан з отворами в його верхній частині.

За живучість заморожених сумішей прийнято час до початку катастрофічної втрати маси зразків (Δm) заморожених сумішей при їх обертанні в сітчастому барабані на приладі мод. 056. Зміну маси досліджуваних зразків проводили через кожні 60 с їх обертан-

ня у барабані на електронних вагах з точністю 0,1 г.

Результати досліджень. Вплив типу глини та її кількості в суміші до 7 % (за масою) при 5 % (за масою) води і витримки сумішей до заморожування впродовж 24 годин досліджували на сумішах, склад яких наведено в табл. 1.

Результати досліджень впливу типу та масового вмісту глини (Гл) на обсипальність (Ос) заморожених зразків з 5 % водопровідної води наведені у вигляді відповідних залежностей на рис. 1.

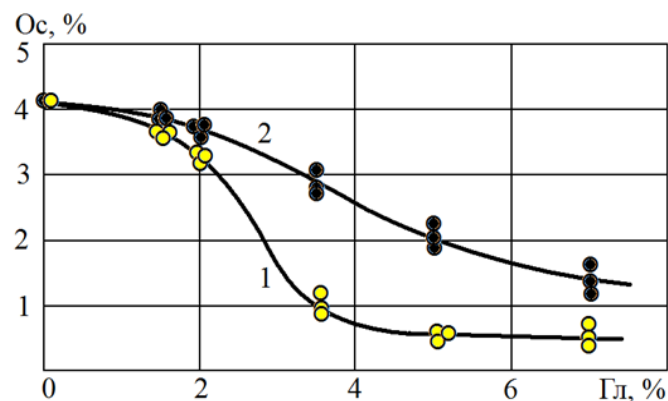


Рис. 1. Залежність обсипальності замороженого кварцового піску від масового вмісту в ньому бентонітової (1) та каолінової (2) глини (Гл)

З аналізу ходу залежностей на рис. 1 встановлено, що найбільшу обсипальність ($4,1 \pm 0,22$ %) мають суміші з піску і води без будь-якої глини. Збільшення вмісту в суміші бентонітової (до 5 %) та каолінової (до 7 %) глини призводить до зменшення обсипальності. При цьому, бентонітова глина більш ефективно знижує обсипальність сумішей ніж каолінова.

Така закономірність пояснюється тим, що на відміну від каолінової глини, бентонітова набухає з більшим збільшенням в об'ємі. Завдяки цьому площа поперечних перерізів глинистих манжет між зернами піску стає більшою, ніж у манжет з каоліновою глиною. Як результат, міцність зв'язків між зернами у сумішах з бентонітовою глиною стає більше, ніж міцність у сумішах з каоліновою глиною, що і призводить до встановленого характеру зменшення обсипальності сумішей. Тобто, з аналізу отриманих даних випливає, що в заморожених піщано-глинистих сумішах з точки зору найменшої обсипальності доцільно використовувати бентонітову глину у кількості 5 % (за масою).

Для визначення впливу води з різною газонасиченістю та часу активації глини (часу контактування води з глиною до моменту виготовлення зразків) на

Таблиця 1

Склад заморожених сумішей для визначення їх обсипальності

Склад суміші, %мас.	Номер суміші											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вода	5											
Пісок	95	93,5	93	91,5	90	88	95	93,5	93	91,5	90	88
Каолінова глина	0	1,5	2	3,5	5	7	—	—	—	—	—	—
Бентонітова глина	—	—	—	—	—	—	0	1,5	2	3,5	5	7

ПРОЦЕСИ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕРІАЛИ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

властивості заморожених форм, готували відповідні суміші, для чого воду додавали у суміш кварцового піску з глиною та перемішували 6 хв у лабораторних каткових бігунах. При цьому, в одному випадку, зразки виготовляли відразу по завершенню виготовлення суміші, а в іншому — після 24 годин витримки приготованої суміші в щільно закритій ємності. Для дегазації води, водопровідну воду кип'ятили та охолоджували до кімнатної температури.

З підготовлених формувальних сумішей на лабораторному копрі виготовляли зразки Ø50×50 мм. Для затвердіння зразки поміщали в морозильну камеру з температурою -15 ± 1 °C і витримували при цій температурі не менше 24 годин. Після заморожування ви-

значали міцність зразків на стиск, їх обсипальність, газопроникність та живучість. Склади досліджуваних формувальних сумішей наведені у табл. 2.

Результати випробувань та розрахунків величин показників зразків наведено в табл. 3, а їх середні арифметичні значення, прийняті для послідуочого використання в даній роботі, наведено в табл. 4.

Аналіз отриманих даних показує, що найбільшу міцність на стиск (3,69...5,22 МПа) і найменшу обсипальність (0,08 %) мають зразки з формувальною сумішшю Б1 (бентонітова глина, яка активована впродовж 24 годин у кип'яченій воді). Найменшу міцність на стиск (0,05...0,08 МПа) і одну з найвищих обсипальностей (1,025 %) мають зразки з формувальною

Таблиця 2

Склади формувальних сумішей для визначення впливу води різної газонасиченості на властивості заморожених форм

Компоненти суміші		Склад формувальної суміші, %мас.											
		Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6	К1	К2	К3	К4	К5	К6
Пісок 1К ₃ О ₃ 016		90											
Глина	Бентонітова	5											
	Каолінова						5						
Активация глини, год		24			0,1			24			0,1		
Вода	Кип'ячена	5			5			5			5		
	Водопровідна		5			5			5			5	
	Газована			5			5			5			5

Таблиця 3

Вплив води різної газонасиченості на властивості заморожених форм

Показники	Склад формувальної суміші, згідно з табл. 2					
	Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6
$\sigma_{ст}$, МПа	3,72—5,22	0,54—0,59	0,22—0,25	0,98—1,09	0,34—0,41	0,10—0,21
К, од	122—137	113—122	75—80	170—183	84—91	59—65
Ос, %	0,05—0,11	0,51—0,57	0,81—1,02	0,38—0,52	0,60—0,65	1,05—1,15
Показники	Склад формувальної суміші, згідно з табл. 2					
	К1	К2	К3	К4	К5	К6
$\sigma_{ст}$, МПа	1,13—1,97	0,55—0,68	0,16—0,20	0,53—0,57	0,35—0,42	0,05—0,08
К, од	142—150	134—146	100—116	49—57	57—67	13—20
Ос, %	0,44—0,53	1,14—1,22	2,79—3,33	0,42—0,56	0,77—0,82	0,98—1,07

Таблиця 4

Середні значення показників заморожених форм та загальний об'єм розвинених у воді кисню та вуглекислого газу

Показники	Склад формувальної суміші, згідно з табл. 2					
	Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6
$\sigma_{ст}$, МПа	4,47	0,565	0,235	1,035	0,375	0,155
К, од	129,5	117,5	77,5	176,5	87,5	62
Ос, %	0,08	0,54	1,005	0,45	0,625	1,1
ОРГ*, мл/л	0	30	890	0	30	890
Показники	Склад формувальної суміші, згідно з табл. 2					
	К1	К2	К3	К4	К5	К6
$\sigma_{ст}$, МПа	1,55	0,615	0,18	0,55	0,385	0,065
К, од	146	140	108	53	62	16,5
Ос, %	0,485	1,18	3,06	0,49	0,795	1,025
ОРГ, мл/л	0	30	890	0	30	890

Примітка. *ОРГ — загальний об'єм розчинених у воді кисню та вуглекислого газу

сумішшю К6 (каолінова глина, яка активована впродовж 0,1 години у газованій воді). При цьому між показниками міцності, обсипальності та газопроникності існує певна функціональна залежність, яка, згідно з даними роботи [19], має загальний вигляд:

$$\sigma_{\text{с}} = f_0 \cdot \rho^3 \cdot l \cdot \frac{K}{\sigma_{\text{сТ}}}, \quad (1)$$

де f_0 — безрозмірний поправочний коефіцієнт; ρ — уявна щільність матеріалу зразка; l — довжина зразка.

Якщо прийняти:

$$f_0 \cdot \rho^3 \cdot l = N, \quad (2)$$

то для досліджуваних заморожених сумішей з бентонітовою глиною формула (1) при $N = 0,0027$ буде мати вигляд:

$$\sigma_{\text{с}} = 0,0027 \cdot \frac{K}{\sigma_{\text{сТ}}}, \quad (3)$$

а для досліджуваних заморожених сумішей з каоліновою глиною при $N = 0,0052$:

$$\sigma_{\text{с}} = 0,0052 \cdot \frac{K}{\sigma_{\text{сТ}}}. \quad (4)$$

Найбільш значущими параметрами (див. табл. 4) є газонасиченість води, яку використовують для виготовлення сумішей, природа глини та час її активації. При цьому рівень технологічних параметрів структурованих (заморожених) сумішей підвищується при використанні бентонітової глини, яка була активована впродовж 24 годин в кип'яченій (дегазованій) воді.

Такі закономірності пояснюються тим, що підвищення часу активації, як і використання бентонітової глини замість каолінової глини, супроводжується значним збільшення її об'єму, та, відповідно, площі перерізу водно-глинистих манжет між піщинками кварцового піску у сумішах. У свою чергу це і призводить до підвищення міцності та зниження обсипальності зразків з таких сумішей. Використання у складі суміші насиченої газами води призводить до того, що під час її кристалізації ці гази виділяються в затверділих водно-глинистих манжетах у вигляді газових тріщин, які значно знижують їх міцність і, відповідно, підвищують обсипальність. При цьому, чим більше газів розчинено у воді, тим більше газових дефектів виникає в її льоді, про що свідчать зображення на рис. 2.

З викладеного випливає, що як і природа глини, і час її активації (ступінь набрякlosti глини), структура льоду, а, відповідно, і насиченість газами вихідної води, є суттєвим важелем в підвищенні міцності і зниженні обсипальності замороженої форми. Чим більше газів розчинено у воді, тим більш пухкі, крихкі і слабкі крижані структури утворюються при кристалізації води, тим більш за кількістю та розмірами виникають у манжетах газові тріщини, тим нижче міцність замороженої форми.

Така залежність пояснюється тим, що насиченість газами вихідної води, відповідно, зумовлює і щіль-

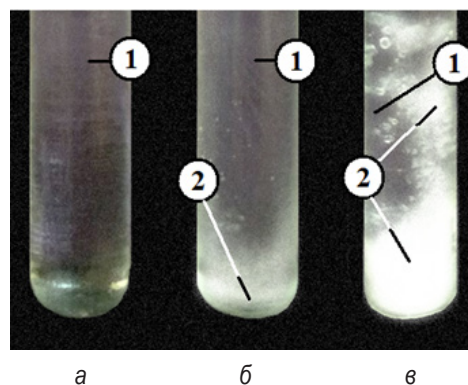


Рис. 2. Вигляд льоду (1) та газових бульбашок в ньому (2) в донній частині пробірок, у яких закристалізована вода без розчинених газів — кип'ячена вода (а), з 30 мл/л розчинених газів — водопровідна вода (б), з 890 мл/л розчинених газів — газувана вода (в)

ність структури водно-гіпсових манжет. Про це, зокрема, свідчать структури заморожених набряклих глин, які наведено на рис. 3, де маса глини та води має співвідношення 1/1.

Вода	Каолінова глина	Бентонітова глина
Кип'ячена		
Водопровідна		
Газувана		

Рис. 3. Вид поверхні руйнування замороженої при -15°C суміші каолінової і бентонітової глини з водою ($\times 10$)

Аналіз зображень на рис. 3 свідчить, що у структурі каолінової глини мережа тріщин та їх розміри значно більші ніж у бентонітової. При цьому, розміри тріщин у обох глин неухильно зростають з підвищенням газонасиченості води, яку використали для виготовлення сумішей.

Виходячи з результатів аналізу попередніх даних, дослідження на живучість проводили для зразків із сумішей (див. табл. 3) Б1, Б2, Б5, К2, К5, а також з суміші чистого піску з 5 % водопровідної води.

Результати проведених досліджень представлені у вигляді залежностей на рис. 4.

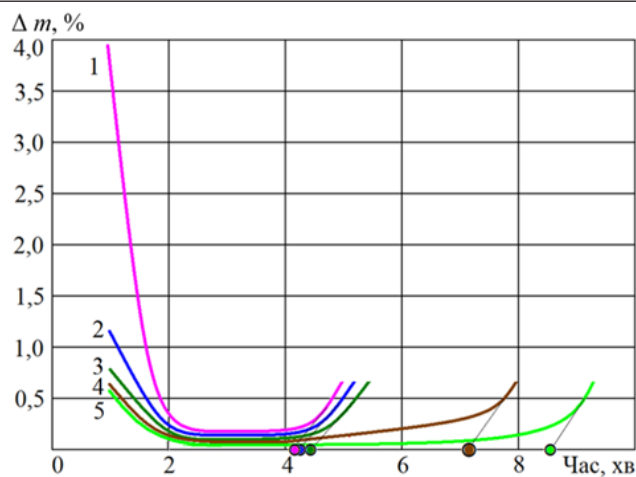


Рис. 4. Кінетичні криві втрати маси зразків з водопровідною водою під динамічним впливом: 1 — без глини; 2 — каолінова набрякла глина; 3 — каолінова ненабрякла глина; 4 — бентонітова ненабрякла глина; 5 — бентонітова набрякла глина

Аналіз ходу залежностей на рис. 4 показує, що найбільшою обсипальністю характеризується суміш піску і води. Додавання до складу суміші 5 % глини різко знижує обсипальність зразків. Ще більше знижує обсипальність використання кип'яченої води. При цьому живучість зразків із сумішей піску та води, сумішей К2 і К5 знаходиться в межах 4,1...4,9 хв. В той же час, суміш Б5 має живучість 7,1 хв, а суміш Б2 — 8,5 хв.

З числа досліджених сумішей найбільша живучість 18...22 хв у суміші з набряклою в кип'яченій воді бентонітовою глиною (Б1), що витікає з ходу залежності на рис. 5.

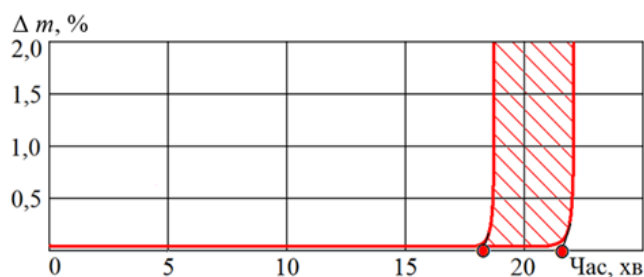


Рис. 5. Кінетичні криві втрати маси під динамічним впливом зразків з бентонітовою глиною, що набрякла у кип'яченій воді впродовж 24 годин

Тобто, з точки зору технологічності заморожених ливарних форм, з числа досліджених складів, суміші піску з кип'яченою (дегазованою) водою і бентонітовою глиною, що активована водою впродовж 24 годин, є кращими.

Обговорення результатів. З аналізу отриманих даних випливає, що для досягнення заданого рівня основних параметрів заморожених при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ піщано-глинистих сумішей з одночасним підвищенням живучості заморожених ливарних форм та стрижнів до ~ 18 хв найбільш доцільним є використання у суміші 5 % бентонітової глини марки БС2Т₂ і 5 % дегазованої (кип'яченої) води з активацією глини у такій воді в складі суміші впродовж 24 годин. Тобто, найліпші

показники має суміш кварцового піску з 5 % (за масою) набряклої бентонітової глини в 5 % (за масою) дегазованій воді. В той же час використання у складі сумішей каолінової глини марки КС2Т₂ недоцільно, оскільки суміші з такою глиною не відповідають вимогам щодо формувальних та стрижневих сумішей.

При цьому слід зазначити, що дегазація води кип'ятінням перед введенням її у суміш та витримка суміші впродовж 24 годин, практично не впливає на насиченість води киснем та вуглекислим газом. Можливо, це пов'язане з невеликою швидкістю поглинання водою цих газів з повітря. Тобто в подальших дослідженнях потрібно встановити залежність зміни, наприклад, величини обсипальності замороженої суміші від часу активації бентонітової глини в ній. Крім того, залишаються не з'ясованими питання як, наприклад, впливає марка бентонітової глини та кварцового піску на властивості таких сумішей, як змінюються властивості заморожених сумішей під час їх витримки на повітрі, який рівень властивостей притаманний оборотним сумішам і як їх в подальшому готувати та використовувати для виготовлення ливарних форм і стрижнів, не встановлено межі застосування таких заморожених сумішей, рівень теплофізичних властивостей таких сумішей і їх вплив на структуру та якість виливків тощо.

Висновки

1. Формувальні суміші, що складаються виключно з піску і води, непридатні для виготовлення ливарних форм та стрижнів у зв'язку з високою обсипальністю.

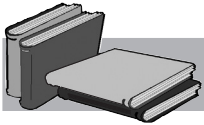
2. Для підвищення міцності і зниження обсипальності для заморожених форм та стрижнів потрібно використовувати суміші піску, води і глини.

3. Додавка до піску з водою бентонітової (БС2Т₂) або каолінової (КС2Т₂) глини призводить до зменшення обсипальності заморожених сумішей та підвищення їх міцності.

4. Заморожені при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ суміші з вмістом каолінової глини до 7 % (за масою) та 5 % (за масою) водопровідної води характеризуються підвищеною обсипальністю, що унеможливує їх використання у якості формувальної або стрижневої суміші.

5. При додаванні у кварцовий пісок 5 % набряклої дегазованою водою бентонітової глини БС2Т₂ обсипальність замороженої суміші стає меншою за 0,1 %, газопроникність досягає 129 од, а міцність на стиск перевищує 4,0 МПа, що відповідає вимогам щодо формувальних та стрижневих сумішей.

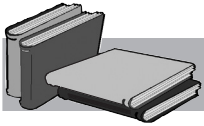
6. Газонасиченість води є потужним важелем в системі керованості рівнем властивостей заморожених ливарних форм, до складу яких входить кварцовий пісок та набрякла бентонітова глина.



ЛІТЕРАТУРА

1. 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*. 2019. No. 1(57). P. 90—98. <https://doi.org/10.15276/opu.1.57.2019.11>
2. Кукуй Д.М., Скворцов В.А., Андрианов Н.В. Теория и технология литейного производства. В 2 ч. Ч. 1. Формовочные материалы и смеси. Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2011. 384 с.
3. 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 world science and education: Abstracts of I International Scientific and Practical Conference, Osaka, Japan, 2—4 October 2019*. Osaka, 2019. P. 202—210.
4. Tao Y., Zou W., Jia J., Li W., Cremer D. Different ways of hydrogen bonding in water — why does warm water freeze faster than cold water? *Journal of Chemical Theory and Computation*. 2016. No. 13(1). P. 55—76. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.6b00735>
5. Шинский О.И., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И. Влияние состава, дисперсности и температуры охлаждения формовочных материалов на прочностные свойства низкотемпературных форм. *Металл и литье Украины*. 2016. № 11—12 (282—283). С. 47—51.
6. J. Shan Zhongde, Yang Hao Qin & Shi Jianpei (2022). Large complex sand freezing mold, low temperature molding and joint production method with undercooling control. (China Patent No. CN113579161B). Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.
7. N. Gundolf Dipl Ing Helering (1979). Foundry molds made by freezing wet sand — the sand is cooled by a liquid, nitrogen is mixed with the wet sand and driven into a flask. (German Patent No. DE2909839A1). Linde GmbH.
8. Bakshi, B., Singh & Emil, Jespersen (1985). Method for making frozen molds for casting. (Canadian Patent No. CA1183320A). Dansk Industri Syndikat AS.
9. Shan Zhongde, Yang Hao Qin & Dai Yufeng (2021). A method of preparing a mold from a mixture of frozen sand and short fibers. (China Patent No. CN113560486A). Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.
10. Hoshiyama Y., Nakashima K., & Matsumoto H. Simultaneous fabrication of multiple castings using frozen mold casting method. *Defect and Diffusion Forum*. 2020. Vol. 405. P. 75—79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.405.75>
11. Yang H., Shan Z., Yan D., Shi J., & Liu Q. Research on forming method of additive manufacturing of frozen sand mold. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Iss. 8. P. 1—5. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19340>
12. Shan Zhongde, Liu Fenglandun & Dong Xiaoli (2016). A variation of the containerless casting process is formed from frozen sand. (China Patent No. CN105665637B). Center for Advanced Manufacturing Technology of Chinese Academy of Engineering Science and Technology.
13. Shang Zhongde, Liu Fenglandong & Dong Xiaoli (2018). A kind of frost sand mold production process of containerless casting. (China Patent No. CN105665637B). Beijing Institute of Light Quantitative Science and Research.
14. Замятин Н.И., Лысенко Т.В., Крейцер К.А., Бондарь А.А. Получение отливок в замороженных формах под низким давлением. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 2/5(62). С. 50—54.
15. Дорошенко В.С. Льодові моделі в ливарному виробництві металовиробів — технологія за методом «просто додай води». *Світосгляд*. 2017. № 1(63). С. 62—69.
16. Дорошенко В.С. Структура досліджень по розробці технології литья по ледяним моделям з використанням ряду особливостей і природних явлень. *Процеси литья*. 2017. № 1. С. 39—46.
17. А. с. № 1121089 СССР, МКИ В22С7/00. Неразъемная замороженная модель для низкотемпературной формовки / О.И. Шинский, В.И. Московка, В.А. Шевченко и др. опубл. 1984. Бюл. № 40.
18. Shi J., Shan Z., Yang H. Experimental and modeling investigation of freezing behavior for frozen sand molds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023. Vol. 215. 124499. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124499>
19. Солоненко Л.И., Репях С.И. 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.

Надійшла 15.01.2024



REFERENCES

1. Solonenko, L., Prokopovitch, I., Repyakh, S., Sukhoi, K., Dmytrenko, D. (2019). System analysis of modern areas of increasing environmental and sanitary hygienic safety of using cold hardening mixtures in foundry. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 1(57), 90-98. <https://doi.org/10.15276/opu.1.57.2019.11>
2. Kukuy, D.M., Skvortsov, V.A., Andrianov, N.V. (2011). Theory and technology of foundry production. In 2 parts. Part 1. Molding materials and mixtures. Minsk: New knowledge; Moscow: INFRA-M. 384 p. [in Russian].
3. Solonenko, L.I., Usenko, R.V., Belyi, A.P., Repyakh, S.I. (2019). Characteristics of some casting methods and mixtures of disposable molds and cores for castings weighing up to 300 kg. *Perspectives of world science and education: Abstracts of I International Scientific and Practical Conference*, Osaka, Japan, 2-4 October 2019. Osaka, 202-210 [in Russian].
4. Tao, Y., Zou, W., Jia, J., Li, W., & Cremer, D. (2016). Different ways of hydrogen bonding in water – why does warm water freeze faster than cold water? *Journal of Chemical Theory and Computation*, 13(1), 55-76. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.6b00735>
5. Shinskii, O.I., Lysenko, T.V. & Solonenko, L.I. (2016). The influence of composition, dispersity and temperature of cooling mold materials on the mechanical properties of low-temperature forms. *Metal and Casting of Ukraine*, 11-12 (282-283), 47-51 [in Russian].
6. J. Shan Zhongde, Yang Hao Qin & Shi Jianpei (2022). Large complex sand freezing mold, low temperature molding and joint production method with undercooling control. (China Patent No. CN113579161B). Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.
7. N. Gundolf Dipl Ing Helering (1979). Foundry molds made by freezing wet sand – the sand is cooled by a liquid, nitrogen is mixed with the wet sand and driven into a flask. (German Patent No. DE2909839A1). Linde GmbH.
8. Bakshi, B., Singh & Emil, Jespersen (1985). Method for making frozen molds for casting. (Canadian Patent No. CA1183320A). Dansk Industri Syndikat AS.
9. Shan Zhongde, Yang Hao Qin & Dai Yufeng (2021). A method of preparing a mold from a mixture of frozen sand and short fibers. (China Patent No. CN113560486A). Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.
10. Hoshiyama, Y., Nakashima, K., & Matsumoto, H. (2020). Simultaneous fabrication of multiple castings using frozen mold casting method. *Defect and Diffusion Forum*, 405, 75-79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.405.75>
11. Yang, H., Shan, Z., Yan, D., Shi, J., & Liu, Q. (2023). Research on forming method of additive manufacturing of frozen sand mold. *Heliyon*, 9(8), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19340>
12. Shan Zhongde, Liu Fenglandun & Dong Xiaoli (2016). A variation of the containerless casting process is formed from frozen sand. (China Patent No. CN105665637B). Center for Advanced Manufacturing Technology of Chinese Academy of Engineering Science and Technology.
13. Shang Zhongde, Liu Fenglandong & Dong Xiaoli (2018). A kind of frost sand mold production process of containerless casting. (China Patent No. CN105665637B). Beijing Institute of Light Quantitative Science and Research.
14. Zamyatin, N.I., Lysenko, T.V., Kreitser, K.A., Bondar, A.A. (2013). Production of castings in frozen molds under low pressure. *East European Journal of Advanced Technologies*. 2/5(62), 50-54 [in Russian].
15. Doroshenko, V.S. (2017). Ice models in liquefied fermentation of metal-producing substances are a technology based on the “just add water” method. *Svitoglyad*, 1(63), 62-69 [in Ukrainian].
16. Doroshenko, V.S. (2017). Research structure for the development of ice casting technology using a number of features and natural phenomena. *Casting Processes*, 1, 39-46 [in Russian].
17. Shinsky, O.I., Moskovka, V.I., Shevchenko, V.A. (1984). One-piece frozen model for low temperature molding (A.S. No. 1121089 USSR), publ. 1984 [in Russian].
18. Shi, J., Shan, Z., Yang, H. (2023). Experimental and modeling investigation of freezing behavior for frozen sand molds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 215, 124499. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124499>
19. Solonenko, L.I., Repyakh, S.I. (2019). Flaking of liquid glass molds and rods. *New materials and technologies in machine-building: materials of the XI International Scientific and Technical Conference* (Kyiv, May 30-31, 2019). Kyiv: KPI im. Igor Sikorsky, 178-179 [in Russian].

Received 15.01.2024

Summary

L.I. Solonenko¹, Dr. Sci. (Engin.), Assistant, Associate Professor at the Department of Civil Safety and Occupational Safety, e-mail: solonenkoli14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

S.I. Rep'yakh², Dr. Sci. (Engin.), Senior Researcher, Professor at the Department of foundry production, e-mail: 123rs@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>

M.I. Zamyatin¹, PhD (Engin.), Associate Professor at the Department of Materials Science and Materials Engineering, e-mail: zamyatinnikiv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8458-6341>

O.P. Bilyi², Assistant, Professor at the Department of foundry production, e-mail: baplitvo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1234-5404>

I.A. Kostenko¹, Graduate student at the Department of Digital Technologies in Engineering, e-mail: avianazemnoe@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-1566-3674>

¹Odesa Polytechnic National University (Odesa, Ukraine)

²Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro, Ukraine)

Water gas saturation as a lever for controlling the level of properties of frozen foundry molds

The purpose of the work is to increase the survivability of sand-clay forms that freeze in equipment without the use of liquefied gases.

Quartz sand 1K₃O₃016, bentonite clay BS2T₂, kaolin clay KS2T₂, tap water, carbonated water and degassed (boiled) water were used in the research. Flowability was determined according to GOST 23409.9, compressive strength – GOST 23409.7, gas permeability – GOST 29234. 11.

In order to achieve the specified level of the main parameters of sand-clay mixtures frozen at –15 °C with a simultaneous increase in the survivability of frozen casting molds and rods up to ~18 min, it is most appropriate to use a mixture of 5 % bentonite clay of the BS2T₂ brand and 5 % of degassed (boiled) water with clay activation in such water as part of the mixture for 24 hours. At the same time, the use of KS2T₂ kaolin clay as part of mixtures is impractical, since mixtures with such clay do not meet the requirements for molding and core mixtures.

Molding mixtures consisting exclusively of sand and water are not suitable for the production of casting molds and rods due to high flowability. To increase the strength and reduce the flowability, it is necessary to use a mixture of sand, water and clay for the production of frozen molds and rods. Addition of bentonite (BS2T₂) or kaolin (KS2T₂) clay to sand and water leads to a decrease in the flowability of frozen mixtures and an increase in their strength. Frozen at –15 °C mixtures with a kaolin clay content of up to 7 % (by mass) and 5 % (by mass) of tap water are characterized by increased flowability, which makes it impossible to use them as a molding or core mixture. When adding 5 % of bentonite clay BS2T₂ swollen with degassed water to quartz sand, the flowability of the frozen mixture becomes less than 0.1 %, the gas permeability reaches 129 units, and the compressive strength exceeds 4.0 MPa, which meets the requirements for molding and rod mixtures. The gas saturation of water is a powerful lever in the system of controlling the level of properties of frozen casting molds, which include quartz sand and swollen bentonite clay.

Keywords

Mixture, form, water, gas, solubility, survivability, strength.