ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 34, 2026, № 2 (345), 8-17

https://doi.org/10.15407/steelcast2026.02.008

УДК 621.74.046:621.74.041

М.М. Дьяченко, аспірант, e-mail: maximail@ukr.net, https://orcid.org/0009-0002-4957-9407

П.Б. Калюжний, канд. техн. наук, заст. директора, e-mail: kpb.ptima@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1111-4826

І.А. Шалевська, д-р техн. наук, доц., заст. директора, e-mail: innashalevska@gmail.com,
https://orcid.org/0000-0002-8410-7045

С.В. Гнилоскуренко, канд. техн. наук, ст. дослідник, зав. відділу, e-mail: slava.vgn@gmail.com,
https://orcid.org/0000-0003-0201-7191

В.О. Овсянников, головний технолог, e-mail: otdel.vch@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України (Київ, Україна)

Визначення впливу вмісту рідкого скла в наповнювачі чавунних і сталевих литих модулів на показники його стійкості до пробивання

У статті досліджено вплив вмісту рідкого скла на пробиваємість рідкоскляних піщаних наповнювачів, інтегрованих у чавунні та сталеві оболонки, отримані методом лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ). Були виготовлені зразки з вмістом рідкого скла від 4 до 16 г на 100 г кварцового піску для проведення випробування з використанням лабораторного копра за методикою, адаптованою для оцінки вибивності ливарних сумішей. Встановлено, що робота пробивання зростає зі збільшенням вмісту рідкого скла. Для чавунних оболонок істотне зростання стійкості до пробивання починається при вмісті рідкого скла 9,1 %, а для сталевих — від 12,3 %. Перехідний шар між металом і наповнювачем у чавунних зразках є в 2—4 рази товщим (1,5—4,0 мм), ніж у сталевих (0,5—1,6 мм), що пояснюється кращою рідкоплинністю чавуну та вищою адгезією силікатної фази до чавуну. Водночас мікроструктура та мікротвердість перехідного шару не залежать від вмісту рідкого скла. Рекомендовано застосовувати для системи «чавун — рідкоскляний наповнювач» вміст рідкого скла 12—14 г на 100 г піску, а для системи «сталь — рідкоскляний наповнювач» — 14–16 г. Отримані результати дозволяють використовувати рідкоскляний наповнювач як ефективну заміну частини металу в литих модулях захисних та несучих конструкцій.

Ключові слова: *литі композиційні матеріали; лиття за моделями, що газифікуються; чавунне та сталеве лиття; рідкоскляна суміш; пробиваємість; перехідний шар; функціональний наповнювач; залишкова міцність.*

Вступ. Натепер в Україні надважливою задачею є захист енергетичних та громадських об'єктів від різного типу пошкоджень і ураження. Зазвичай для захисту таких об'єктів використовуються бетонні споруди [1] або мішки із насипним піском. У ФТІМС НАН України запропоновано розробки, які передбачають заміщення таких бетонних споруд на модульні металеві конструкції, пустотілі [2, 3] або з наповнювачами [4, 5]. Удосконалення таких модульних конструкцій та зменшення маси не втратили актуальності з точки зору досягнення високої міцності при зменшенні ваги.

Розроблені у ФТІМС НАН України модулі із неметалевим наповнювачем для будівництва захисних споруд, являють собою литу оболонку із функціональним неметалевим наповнювачем, що розміщений усередині виливка, для зміцнення та підвищення стійкості до пробивної та кумулятивної

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY license
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

дії [3].

Як неметалевий наповнювач для таких конструкцій може використовуватися піщана рідкоскляна суміш, яка після теплового впливу металу при литті оболонок, зберігає високу залишкову міцність. З теорії ливарної форми відомо, що рідкоскляні суміші мають погану вибивність, що у випадку захисних конструкцій розглядається як перевага. Причиною цього є висока залишкова міцність, тобто механічна міцність рідкоскляних сумішей після термічного впливу в процесі лиття. На відміну від традиційних ливарних стрижнів, де висока залишкова міцність є недоліком, у захисних литих модулях, які працюють в умовах можливих ударів та проникнень, міцність наповнювача визначає його ефективність як бар'єра, здатного поглинати енергію руйнування.

На межі метал-наповнювач важливе формування перехідного шару за рахунок просочення металу в наповнювач [5] теплової та хімічної взаємодії, що сприяє підвищенню міцності всієї конструкції. У процесі теплової взаємодії рідке скло, яке входить до складу наповнювача, зазнає дегідратації та переходить у склоподібну силікатну фазу. За рахунок поєднання властивостей компонентів, металу та піску, перехідний шар може слугувати як демпферний прошарок, що знижує передачу механічного навантаження від оболонки до наповнювача.

Відомо, що міцність рідкоскляної суміші залежить від вмісту рідкого скла, однак властивості інтегрованого наповнювача в металі після лиття можуть істотно змінюватися через дію різних ливарних чинників. Для дослідження властивостей таких рідкоскляних сумішей після лиття може бути використана методика, яка наведена у роботі [6], зокрема щодо оцінки пробиваємості наповнювачів, як властивості, що характеризує здатність неметалевого наповнювача протидіяти проникненню в нього сторонніх тіл. Тому метою цієї роботи було визначення впливу вмісту рідкого скла на пробивання рідкоскляних наповнювачів у чавунних та сталевих литих модулях.

2. Матеріали та методика досліджень. Для досліджень за технологією лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), виготовляли чавунні та сталеві зразки, внутрішню порожнину яких заповнювали рідкоскляною сумішшю. Її отримували змішуванням кварцового піску річкового ($2K_1O_2025$) та натрієвого рідкого скла з модулем 2,9, яке використовували як зв'язувальний компонент.

Вибір натрієвого рідкого скла як зв'язувального компонента пов'язаний із його поширеністю в ливарному виробництві, а також із механізмом його тверднення. Під час пров'ялювання рідкоскляної суміші, яке може відбуватися за природних умов (при кімнатній температурі) або штучно (при продувці вуглекислим газом), із суміші видаляється волога, та утворюється міцний зв'язок між зернами кварцового піску та рідким склом [7].

Виготовлені чавунні та сталеві зразки мали такі розміри: висота — 50 мм, внутрішній діаметр — 50 мм, товщина стінки — 8 мм. Таку товщину обрано для наближення теплових умов формування виливків захисних модулів.

Вміст рідкого скла у рідкоскляній суміші змінювали від 4 до 16 г на 100 г кварцового піску з кроком 2 г. Масова частка рідкого скла у суміші, розрахована як відношення маси рідкого скла до загальної маси суміші, наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Склади досліджуваних рідкоскляних сумішей

Позначення чавунних зразків	Позначення сталевих зразків	Маса піску, г	Маса рідкого скла, г	Масова частка рідкого скла, %
1-1	1-2	100	4	3,8
2-1	2-2	100	6	5,7
3-1	3-2	100	8	7,4
4-1	4-2	100	10	9,1
5-1	5-2	100	12	10,7
6-1	6-2	100	14	12,3
7-1	7-2	100	16	13,8

Для одержання зразків, дослідну суміш ущільнювали у пінополістирольових циліндрах трьома ударами на стандартному лабораторному копрі (рис. 1). Після цього суміш 40 с продували вуглекислим газом і пров'ялювали впродовж 24 годин. Потім до пінополістирольових зразків приклеювали ливникову систему і пензлем наносили на їхню поверхню протипригарну фарбу, уникаючи її потрапляння на поверхню стрижньової суміші. Після висихання протипригарного покриття модельні блоки формували у контейнерах сухим кварцовим піском.

Заливання зразків виконували чавуном СЧ200 за температури 1425 °С та сталлю 35Л за температури 1610 °С. Після охолодження зразків до кімнатної температури їх відрізали від стояків.

Пробиваємість наповнювачів визначали за методикою, подібно до методу визначення вибивності [8], оцінюючи роботу, необхідну для занурення бойка на певну глибину. Для цього використовували стандартний лабораторний копер, на нижньому кінці вертикального штоку якого кріпився бойок (діаметр 8 мм, довжина 20 мм) із загостреним кінцем [6].

Рис. 1. Пінополістиролові циліндри з наповнювачем (суміш кварцового піску і рідкого скла)

Для випробування на пробивання зразок встановлювали на лабораторний копер, під зразок клали металеве кільце-підставку з отвором діаметром 50 мм. Це забезпечувало вільне пробивання наповнювача із нижньої частини зразка в міру занурення бойка. Випробування тривало до повного занурення бойка у наповнювач (рис. 2). Роботу пробивання визначали за формулою:

$$A = n \cdot m \cdot g \cdot h,$$

де n — кількість ударів, необхідна для повного занурення бойка у зразок; m — маса вантажу, кг; g — прискорення вільного падіння, м/с^2; h — висота падіння вантажу, м.

Маса вантажу копра складала 6,35 кг, висота його падіння — 0,05 м. Тобто робота одного удару копра складала приблизно 3,1 Дж.

Для кожного складу наповнювача випробовували три зразки, після чого розраховували середнє значення роботи по зануренню бойка. Далі чавунні та

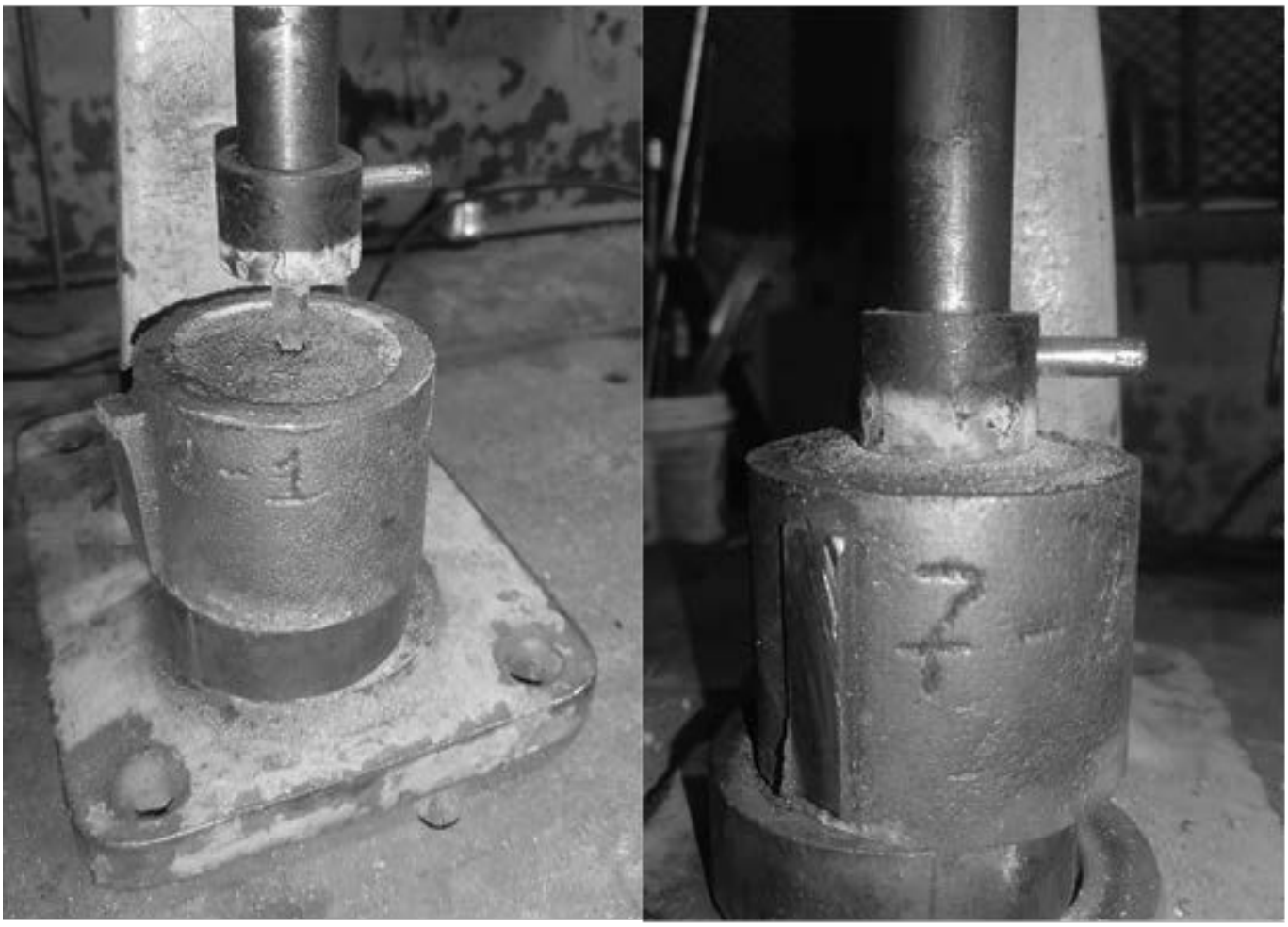


Рис. 2. Зразок на початку та наприкінці випробувань

сталеві зразки розрізали вздовж вертикальної осі та проводили вимірювання товщини перехідного шару з використанням мікроскопа МПБ-3.

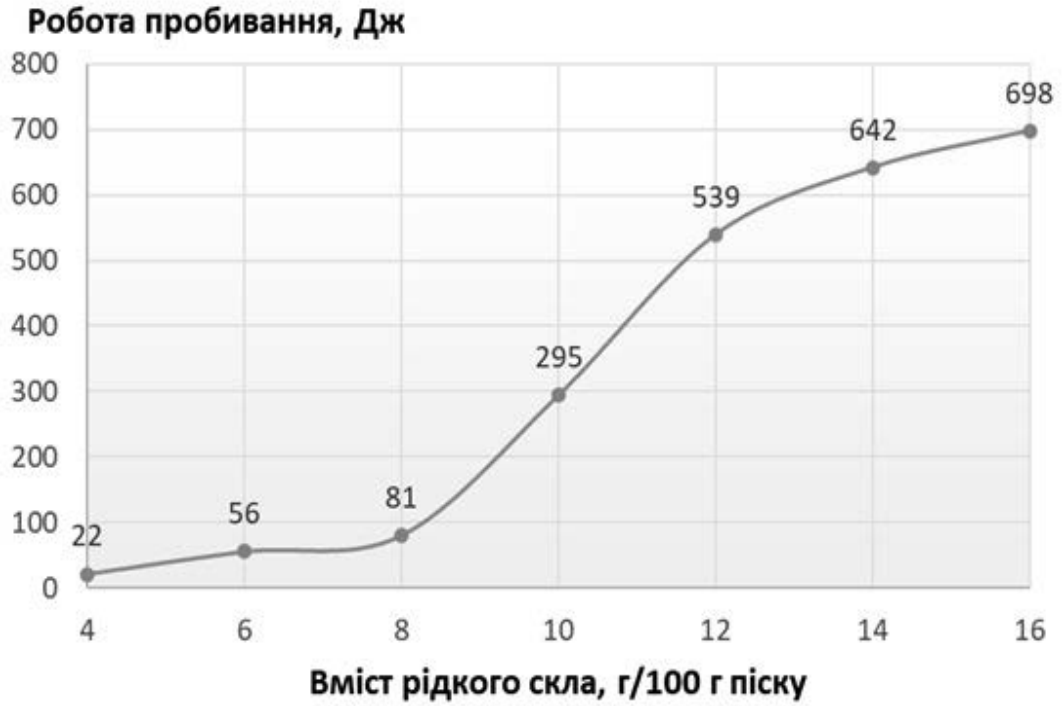
Також, для вивчення структурних змін у металі безпосередньо біля межі контакту з наповнювачем, був проведений мікроструктурний аналіз чавунних зразків. Зокрема, оцінювали форму, розподіл та кількість графітових включень, а також наявність цементиту та перліту, оскільки ці параметри впливають на механічні властивості металу, та всієї системи «метал–наповнювач». Дослідження мікроструктури проводили на виготовлених шліфах за допомогою

оптичного мікроскопа Leica при збільшеннях ×50 та ×100. Травлення виконували 4 % розчином HNO_3 у спирті для виявлення структури металевої основи.

Для оцінки впливу вмісту рідкого скла на твердість чавунної матриці в зоні контакту з наповнювачем було проведено вимірювання мікротвердості на приладі ПМТ-3, навантаження 100 г. Вимірювання виконували в трьох характерних зонах: на відстані 0,5 мм від краю зразка, посередині стінки оболонки та в перехідному шарі.

3. Результати та обговорення

3.1. Випробування на пробивання. Результати розрахунку середніх значень (за трьома випробуваннями) роботи пробивання чавунних і сталевих зразків залежно від вмісту рідкого скла в наповнювачі представлено на рис. 3.



а

б

Рис. 3. Робота занурення бойка у рідкоскляний наповнювач у литих чавунних (*а*) і сталевих (*б*) оболонках залежно від вмісту рідкого скла

Результати пробивання чавунних зразків показують, що при вмісті 4—8 г рідкого скла у наповнювачі, робота пробивання є незначною, близько 80 Дж. Починаючи з 10 г, вона зростає майже утричі, у діапазоні 12—14 г спостерігається подальше двократне збільшення, а при 16 г збільшується до значення 698 Дж. Варто додати, що після повного занурення бойка у зразках 1-1, 2-1, 3-1, 4-1 (з вмістом 4—10 г рідкого скла) при повному зануренні бойка копра, з нижньої сторони випадала частина наповнювача у вигляді конуса. Для чавунних зразків 5-1, 6-1, 7-1 (з вмістом 12, 14 та 16 г рідкого скла на 100 г піску) вибити наповнювач з оболонки не вдавалося, що свідчить про його високу залишкову міцність.

Результати пробивання сталевих зразків показують, що при вмісті 4—10 г рідкого скла у наповнювачі, робота пробивання також є невисокою. При 12 г рідкого скла у наповнювачі, вона починає зростати, при 14 г рідкого скла у наповнювачі робота пробивання збільшується у чотири рази, а при 16 г рідкого скла у наповнювачі, зростає ще вдвічі порівняно із попереднім зразком, досягаючи значення 1209 Дж. При цьому, після повного занурення бойка у сталевих зразках 1-2, 2-2, 3-2, 4-2, 5-2 (з вмістом 4–12 г рідкого скла на 100 г піску), при повному зануренні бойка копра, з нижньої сторони випадала частина наповнювача у вигляді конуса. Зі зразків 6-2, 7-2 (з вмістом 14 та 16 г рідкого скла на 100 г піску) вибити наповнювач з металевої оболонки не вдавалося.

Для чавунних та сталевих зразків зі збільшенням вмісту рідкого скла в наповнювачі спостерігається зростання роботи пробивання, однак характер цього зростання відрізняється. Суттєве зростання стійкості до пробивання спостерігається у чавунних зразках при вмісті рідкого скла 12—14 г на 100 г кварцового піску, а для сталевих, при вмісті 14—16 г.

Різниця в роботі пробивання між чавунними та сталевими зразками при однаковому вмісті рідкого скла пов'язана з залежністю міцності рідкоскляних сумішей від температури та відповідно різними тепловими умовами у наповнювачі.

При зміцненні рідкоскляних сумішей шляхом впливу CO_2 на рідке скло відбувається утворення гелю кремнієвої кислоти, який зв'язує зерна суміші. При цьому вода стає частиною гелю. Також при зміцненні відбувається часткове видалення води із суміші шляхом нагрівання або в'ялення, рідке скло перетворюється на склоподібний силікат, який сприяє формуванню високої міцності ущільненій рідкоскляній суміші. Найбільша міцність на стискання досягається при нагріванні до температури 200 ºС, а з подальшим підвищенням температури міцність зменшується. Проте при температурах нагрівання 1000—1200 ºС відбувається вторинне підвищення міцності рідкоскляних сумішей. Це пояснюється тим, що рідкоплавкі сполуки, що утворюються між Na_2O і SiO_2, огортають зерна піску і при охолодженні переходять у тверде тіло, зв'язуючи зерна у тверду масу [9].

Варто зазначити, що силікати натрію, які входять до складу рідкоскляних сумішей, мають температуру плавлення близько 800 ºС [8]. Тому вторинне підвищення міцності може розпочинатися вже при цій температурі. За нашими експериментальними даними (для чавуну) та розрахунковою оцінкою (для сталі), при заливанні чавуном наповнювач прогрівається до температур 800—900 ºС, а при заливанні сталлю — до 900—1000 ºС.

Іншою причиною відмінних властивостей між чавунними і сталевими зразками є усадка металевої оболонки, що відбувається в процесі кристалізації металу. Внаслідок усадки оболонка зменшується, що призводить до додаткового обтиснення розташованого всередині оболонки наповнювача. Оскільки усадка сталі є більшою, ніж чавуну, сталева оболонка створює більший радіальний тиск на наповнювач. За низької міцності наповнювача (за низького вмісту рідкого скла) утворені зв'язки між зернами піску можуть руйнуватися під дією усадкових напружень в металевій оболонці, тоді як при достатньому вмісті рідкого скла те саме стиснення додатково ущільнює наповнювач та підвищує його міцність. Тому в сталевих зразках вплив усадки на залишкову міцність проявляється при вмісті 4—12 г рідкого скла на 100 г кварцового піску, а у чавунних лише до вмісту 8 г рідкого скла, що і відображається на роботі пробивання.

3.2. Товщина перехідного шару. Для визначення чи впливає на показник стійкості до пробивання наповнювача величина перехідного шару проводили вимірювання його товщини. За допомогою оптичного мікроскопа МПБ-2, при збільшенні ×24, вивчали розрізані зразки та вимірювали по всій висоті оболонки мінімальну та максимальну товщину перехідного шару (рис. 4). На рис. 5 представлено розрізані чавунні та сталеві зразки.

Як видно з рис. 4, перехідний шар у чавунних зразках є в 2–4 рази товщим ніж у сталевих незалежно від вмісту рідкого скла. При цьому чіткої залежності товщини від вмісту рідкого скла не спостерігається для жодного з типів сплавів. Для чавунних виливків найтовщий перехідний шар зафіксовано у зразка 2-1 (до 4 мм), а найтонший — у зразка 7-1 (1,5—2,0 мм). У сталевих виливках найтовщий шар був у зразка 1-2 (1,2—1,6 мм), а найтонший — у зразках 5-2 і 7-2 (0,5—0,7 мм).

Формування перехідного шару є складним тепломасообмінним процесом. В дослідженні [10] зазначено, що температура розм'якшення натрієвого силікатного скла при збільшенні модуля від 2,07 до 3,87 підвищується з 590 до 665 ºС, а температура розтікання — з 760 до 870 ºС. У цьому температурному діапазоні відбувається видалення вологи із суміші, що призводить до утворення порового простору, в який під дією капілярних сил проникає рідкий метал, забезпечуючи просочення [11], а також можливе спікання кварцових зерен, що створює міцний зв'язок після охолодження [12, 13].

Чавун, завдяки кращій рідкоплинності та кращому змочуванню кварцових зерен порівняно зі сталлю, проникає глибше в поровий простір наповнювача, формуючи товстіший перехідний шар.

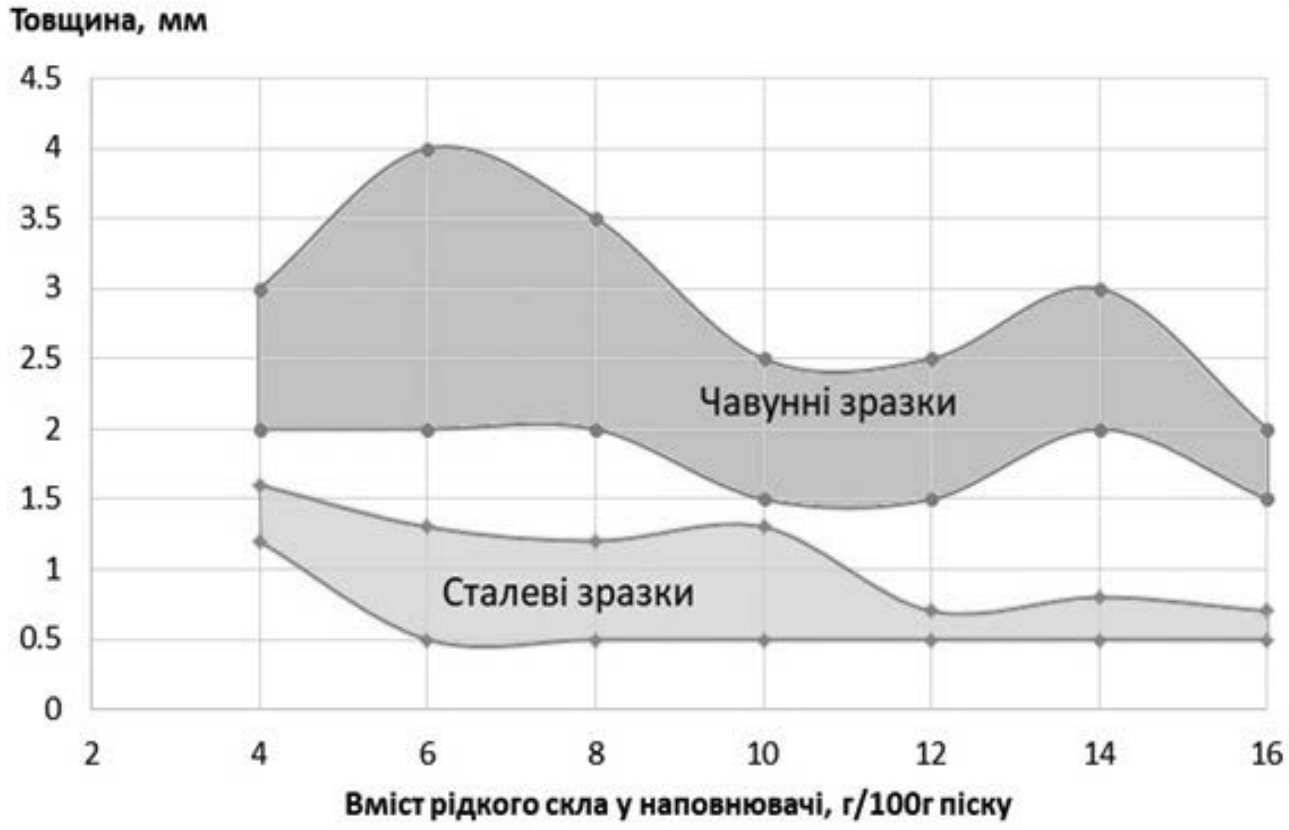


Рис. 4 Товщина перехідного шару для чавунних та сталевих зразків залежно від вмісту рідкого скла у наповнювачі

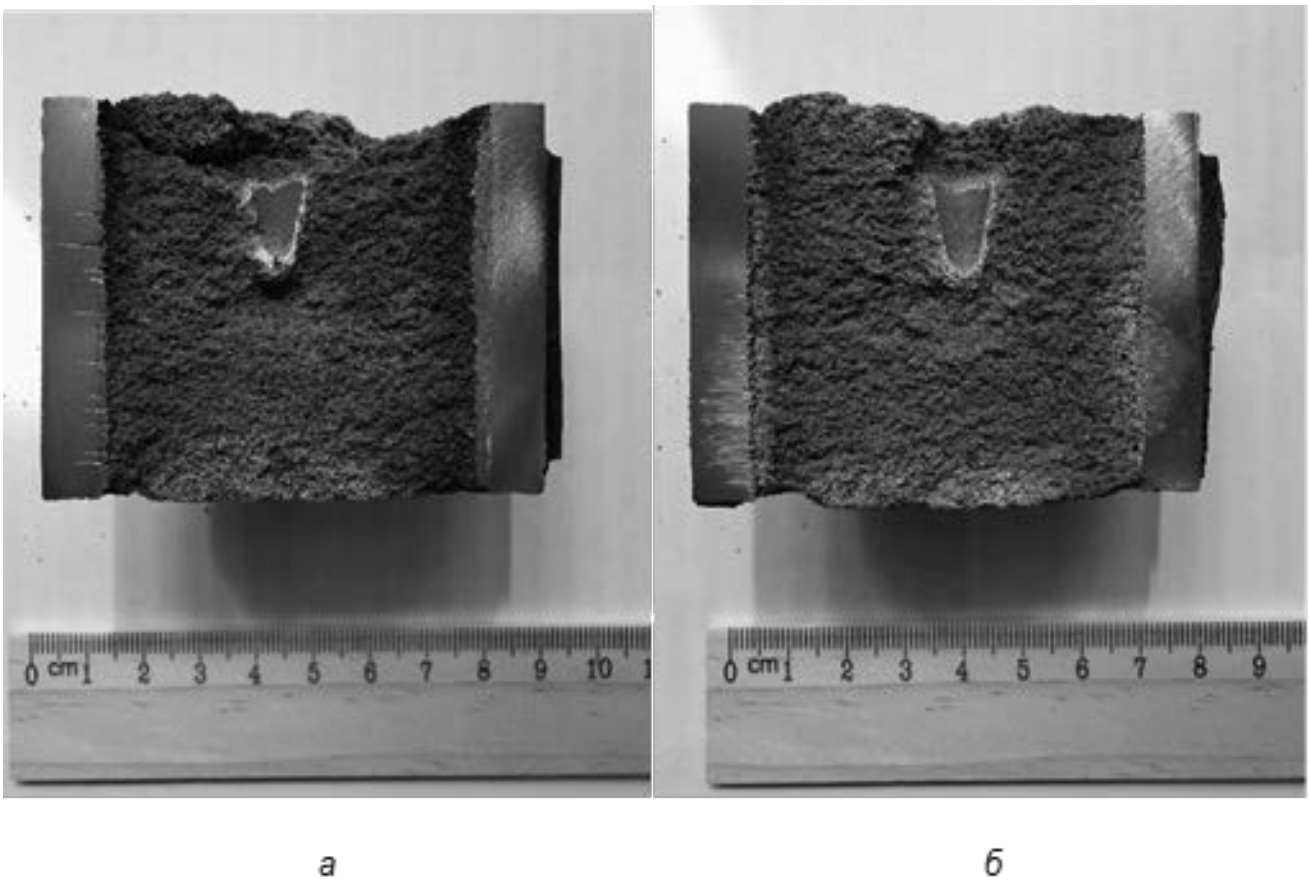


Рис. 5 Розрізані чавунний (*а*) та сталевий зразки (*б*) для проведення вимірювання товщини перехідного шару

Це підтверджується тим, що навіть при нижчій температурі заливання чавуну, товщина перехідного шару в чавунних зразках є в 2—4 рази більшою, ніж у сталевих. Крім того, в роботі [8] зазначено, що зі збільшенням вмісту вуглецю з 2,2 % до 2,8 % робота адгезії силікатного розплаву зростає стрибкоподібно, тому для чавуну адгезія з наповнювачем є максимальною, що сприяє формуванню товстого та міцного перехідного шару, а для низьковуглецевої сталі адгезія є значно нижчою, що обмежує товщину перехідного шару.

Із отриманих результатів можна зробити висновок, що товщина перехідного шару не є визначальним критерієм залишкової міцності. Навіть при тоншому перехідному шарі наповнювач з 13,8 % рідкого скла у сталевих оболонках має вищу стійкість до пробивання, ніж у чавунних, що обумовлено в першу чергу міцністю самої рідкоскляної суміші. З іншого боку, наявність перехідного шару позитивно впливає на з'єднання між металевою оболонкою та неметалевим наповнювачем. Перехідний шар може виконувати роль демпферного прошарку, який частково буде поглинати та розсіювати енергію удару і перешкоджати руйнуванню конструкції системи «метал–наповнювач» при динамічних навантаженнях.

3.3. Мікроструктурний аналіз в зоні контакту чавуну з наповнювачем. Для оцінки можливого впливу вмісту рідкого скла на формування структури перехідного шару, чавунні зразки з мінімальним № 1-1 та максимальним № 7-1 вмістом рідкого скла, серед наявних зразків, вивчали на оптичному мікроскопі при збільшеннях ×50 та ×100 (рис. 6).

Дослідження зразка № 1-1 в нетравленому стані показало, що у структурі чавуну спостерігається

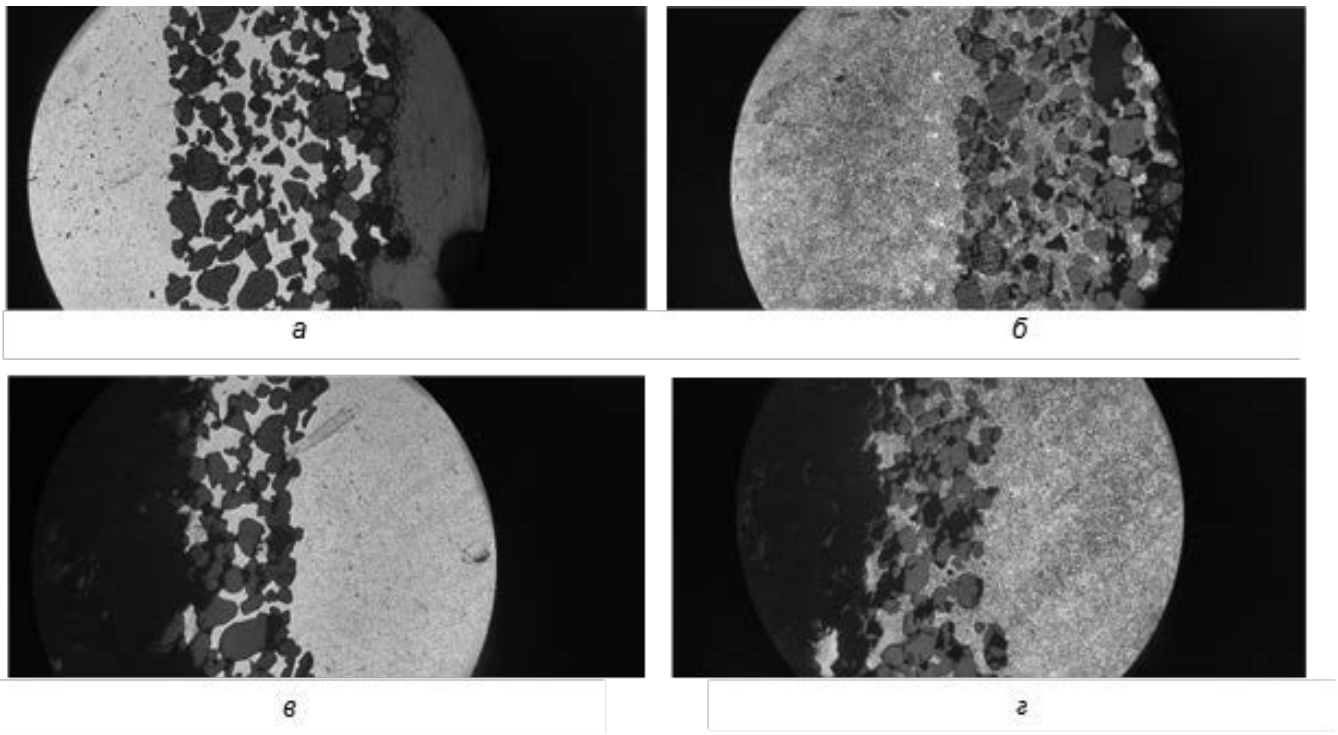


Рис. 6 Мікроструктура перехідного шару у чавунних зразках 1-1 (*а*, *б*) і 7-1 (*в*, *г*) в нетравленому стані (*а*, *в*) і травленому стані (*б*, *г*) при збільшенні ×50

графіт у вигляді окремих пластинчастих колоній, з нерівномірним розподілом та ділянками збіднення графітом біля поверхні, що контактувала з наповнювачем. Після травлення чавунна матриця представлена пластинчастим перлітом з невеликою кількістю цементиту, при цьому на окремих ділянках біля поверхні виявлено локальне збільшення вмісту цементиту до 4 %. Утворення включень цементиту може бути викликане локальним підвищенням швидкості охолодження металу у поверхневому шарі оболонки.

Дослідження зразка № 7-1 в нетравленому стані показало, що графітні включення мають пластинчасту форму, їх розподіл більш рівномірний, при цьому змін у кількості графіту біля поверхні не спостерігається. Після травлення металічна основа представлена пластинчастим перлітом з цементитом у меншій кількості, до 2 %, порівняно зі зразком № 1-1, що розташований переважно у вигляді окремих включень при більш однорідній структурі, без виражених зон локального утворення цементиту.

Рівномірний розподіл графіту та зменшення кількості цементиту в зоні контакту (зразок № 7-1) є сприятливими факторами для підвищення в'язкості та зниження крихкості чавунної матриці.

3.4. Мікротвердість чавунної матриці та перехідного шару. Для порівняння властивостей чавунної матриці в перехідному шарі та оболонці провели визначення мікротвердості в зразках 1-1 та 7-1 на відстані 0,5 мм від краю (зі сторони перехідного шару), посередині стінки оболонки та безпосередньо в зоні перехідного шару. Отримані значення мікротвердості чавуну для всіх зон перебувають у

Таблиця 2

Мікротвердість у різних зонах чавунних зразків

Зона вимірювання	Зразок 1-1	Зразок 7-1
	Середні значення, МПа	
0,5 мм від краю	2390	1784
Середина стінки оболонки	2505	2314
Перехідний шар	2441	2763

діапазоні 1700—2800 МПа (табл. 2).

Проведені дослідження показують, що істотних відмінностей у твердості металевої матриці чавуну оболонки та перехідного шару не виявлено.

Висновки

У результаті проведення порівняльних досліджень роботи пробивання та товщини перехідного шару для чавунних і сталевих зразків з рідкоскляним наповнювачем при вмісті рідкого скла від 4 до 16 г на 100 г піску можна зробити такі висновки:

1. Зі збільшенням вмісту рідкого скла в наповнювачі спостерігається зростання роботи пробивання. Для чавунних зразків істотне збільшення стійкості до пробивання наповнювача відбувається при вмісті рідкого скла від 9,1 %, а для сталевих — від 12,3 %. Робота пробивання наповнювачів при вмісті 10,7—13,8 % рідкого скла у чавунних оболонках складає 539—698 Дж, та при вмісті рідкого скла 12,3—13,8 % у сталевих оболонках — 574–1209 Дж.

2. Перехідний шар у чавунних зразках є товщим (1,5—4,0 мм), ніж у сталевих зразках (0,5—1,6 мм), незалежно від вмісту рідкого скла, що пояснюється глибшим проникненням розплаву чавуну в пори наповнювача внаслідок кращої його рідкоплинності та вищої адгезії силікатної фази до чавуну.

3. Мікроструктура та мікротвердість перехідного шару й основного металу чавунних оболонок не має суттєвих відмінностей та не залежить від вмісту рідкого скла у наповнювачі.

4. Для системи «чавун–рідкоскляний наповнювач» рекомендованим є вміст рідкого скла 12—14 г на 100 г піску (10,7—12,3 %), що забезпечує високу роботу пробивання. Подальше збільшення до 16 г (13,8 %) дає приріст міцності близько 8 %, що може бути економічно недоцільним. Для системи «сталь–рідкоскляний наповнювач» рекомендується вміст рідкого скла 14—16 г на 100 г піску (12,3—13,8 %).

ЛІТЕРАТУРА

1. Бабич Є.М., Кочкарьов Д.И., Філіпчук С.В., Караван Б.В. Конструктивні рішення та розрахунки елементів захисних споруд цивільного захисту з залізобетонними арочними покриттями. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди.* 2021. № 39. С. 162—176. https://doi.org/10.31713/budres.v0i39.019
2. Калюжний П.Б., Шалевська І.А., Шинський О.Й. Розроблення ливарної технології одержання литого захисного модулю за моделями, що газифікуються. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* 2023. № 4. С. 12—18. https://doi.org/10.15588/1607-6885-2023-4-2
3. Шинський О.Й., Шалевська І.А., Калюжний П.Б., Квасницька Ю.Г., Нейма О.В., Шалевський А.В. Особливості одержання литих модулів для побудови захисних споруд. *Метал та лиття України.* 2025. Т. 33. № 3–4 (342–343). С. 106—113. https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.106
4. Shinsky O., Kvasnytska I., Shalevska I., Kaliuzhnyi P., Neima O. Devising a technology for manufacturing hollow cast steel structures with composite and reinforced non-metallic functional filler. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2024. Vol. 6, No. 12 (132). P. 6—14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318553
5. Дьяченко М.М., Корнієць І.В. Дослідження процесів формування перехідного шару на межі сірий чавун–інтегрований неметалевий наповнювач при одержанні легковагових виливків. *Метал та лиття України.* 2025. Т. 33. № 3–4 (342–343). С. 119—130. https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.119
6. Калюжний П.Б., Дьяченко М.М. Оцінка пробиваємості рідкоскляних сумішей як наповнювача литих модулів. XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2025»: матеріали конф., 25—26 вересня 2025 р., Київ / за заг. ред. Р.В. Лютого. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 295—297.
7. Лясс А.М., Валисовский И.В. Об улучшении выбиваемости смесей с жидким стеклом. *Литейное производство*. 1961. № 9. С. 33—36.

8. Медведев Я.И., Валисовский И.В. Технологические испытания формовочных материалов. Москва: Машиностроение, 1973. 312 с.
9. Голофаєв А.М., Лагута В.І., Хінчагов Г.В. Технологія ливарної форми: навч. посіб. М-во освіти і науки України, Східноукр. нац. ун-т. Луганськ: Вид-во СНУ, 2001. 300 с.
10. Weldes H.H., Lange K.R. Properties of Soluble Silicates. *Industrial and Engineering Chemistry.* 1969. Vol. 61, Iss. 4. P. 29—44. https://doi.org/10.1021/ie50712a008
11. Лютий Р.В., Гурія І.М. Формувальні матеріали: підручник для студ. спеціальності 136 «Металургія», освіт. програми «Комп'ютеризовані процеси лиття» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 257 с.
12. Song L., Liu W., Xin F., Li Y. Study of adhesion properties and mechanism of sodium silicate binder reinforced with silicate fume. *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 2021. Vol. 106, article 102820. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102820
13. Anwar N., Jalava K., Orkas J. Experimental Study of Inorganic Foundry Sand Binders for Mold and Cast Quality. *International Journal of Metalcasting.* 2023. Vol. 17. P. 1697—1714. https://doi.org/10.1007/s40962-022-00897-4

REFERENCES

1. Babych, Y. M., Kochkarev, D. I., Filipchuk, S. V., & Karavan, B. V. (2021). Constructional solutions and calculations of elements of protective structures of civil protection with reinforced concrete arched coatings. *Resource-saving materials, structures, buildings and structures*, (39), 162-176. https://doi.org/10.31713/budres.v0i39.019 [in Ukrainian].
2. Kaliuzhnyi, P. B., Shalevska, I. A., & Shinsky, O. Y. (2023). Development of a foundry technology for obtaining a cast protective module by lost foam casting. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, (4), 12-18. https://doi.org/10.15588/1607-6885-2023-4-2 [in Ukrainian].
3. Shinsky, O. Y., Shalevska, I. A., Kaliuzhnyi, P. B., Kvasnytska, Yu. H., Neima, O. V., & Shalevskyi, A. V. (2025). Features of obtaining cast modules for the construction of protective structures. *Metal and Casting of Ukraine, 33*(3-4)(342-343), 106-113. https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.106 [in Ukrainian].
4. Shinsky, O., Kvasnytska, I., Shalevska, I., Kaliuzhnyi, P., & Neima, O. (2024). Devising a technology for manufacturing hollow cast steel structures with composite and reinforced non-metallic functional filler. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6*(12), 6-14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318553
5. Diachenko, M. M., & Korniets, I. V. (2025). Investigation of the processes of transition layer formation at the interface of gray cast iron – integrated non-metallic filler in the production of lightweight castings. *Metal and Casting of Ukraine, 33*(3-4)(342-343), 119-130. https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.119 [in Ukrainian].
6. Kaliuzhnyi, P. B., & Diachenko, M. M. (2025). Otsinka probyvaiemosti ridkosklianykh sumishei yak napovniuvacha lytykh moduliv [Evaluation of the penetration resistance of sodium silicate mixtures as a filler for cast modules]. In R. V. Liutyi (Ed.), XVII International Scientific and Technical Conference "New Materials and Technologies in Mechanical Engineering-2025". Kyiv: KPI named after Ihor Sikorskyi, pp. 295-297 [in Ukrainian].
7. Lyass, A. M., & Valisovskyi, I. V. (1961). Ob uluchshenii vyibivaemosti smesey s zhidkim steklom [On improving the knockout properties of mixtures with liquid glass]. *Foundry Production*, (9), 33-36 [in Russian].
8. Medvedev, Ya. I., & Valisovsky, I. V. (1973). Tehnologicheskie ispyitaniya formovochnyih materialov [Technological testing of molding materials]. Mashinostroenie [in Russian].
9. Holofaiev, A. M., Lahuta, V. I., & Khinchahov, G. V. (2001). Tekhnolohiia lyvarnoi formy: navch. posib. [Foundry mold technology. Study guide]. SNU Publishing House [in Ukrainian].
10. Weldes, H. H., & Lange, K. R. (1969). Properties of Soluble Silicates. *Industrial and Engineering Chemistry, 61*(4), 29-44. https://doi.org/10.1021/ie50712a008
11. Liutyi, R. V., & Huria, I. M. (2020). Formuvalni materialy: pidruchnyk dlia stud. spetsialnosti 136 "Metalurhiia", osvit. prohramy "Kompiuteryzovani protsesy lyttia" [Forming Materials: A Textbook for Students Majoring in 136 "Metallurgy," Educational Program "Computerized Casting Processes"]. KPI named after Ihor Sikorskyi [in Ukrainian].
12. Song, L., Liu, W., Xin, F., & Li, Y. (2021). Study of adhesion properties and mechanism of sodium silicate binder reinforced with silicate fume. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *106*, 102820. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102820
13. Anwar, N., Jalava, K., & Orkas, J. (2023). Experimental study of inorganic foundry sand binders for mold and cast quality. *International Journal of Metalcasting, 17*, 1697-1714. https://doi.org/10.1007/s40962-022-00897-4

Надійшла/Received 24.04.2026

Прийнята/Accepted 21.05.2026

Опублікована/Published 29.05.2026

M.M. Diachenko, PhD student, e-mail: maximail@ukr.net, https://orcid.org/0009-0002-4957-9407
P.B. Kaliuzhnyi, PhD (Engin.), Deputy Director, e-mail: kpb.ptima@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1111-4826
I.A. Shalevska, Dr. Sci. (Engin.), Associate Professor, Deputy Director, e-mail: innashalevska@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8410-7045
S.V. Gnyloskurenko, PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of the Department, e-mail: slava.vgn@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0201-7191
V.O. Ovsiannikov, Chief Technologist, e-mail: otdel.vch@gmail.com

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Determining the Influence of Sodium Silicate Content in the Filler of Cast Iron and Steel Cast Modules on Penetration Resistance Indicators

Summary

The article investigates the effect of sodium silicate content on the penetrability of liquid glass sand fillers integrated into cast iron and steel shells obtained by lost foam casting (LFC). Samples with a sodium silicate content of 4 to 16 g per 100 g of quartz sand were produced for testing using a laboratory drop hammer according to a method adapted for evaluating the knock-out properties of molding sands. It was found that the penetration work increases with increasing sodium silicate content. For cast iron shells, a significant increase in resistance to penetration begins at a sodium silicate content of 9.1 %, while for steel shells – from 12.3 %. The transition layer between the metal and the filler in cast iron samples is 2–4 times thicker (1.5–4.0 mm) than in steel samples (0.5–1.6 mm), which is explained by the better fluidity of cast iron and higher adhesion of the silicate phase to cast iron. At the same time, the microstructure and microhardness of the transition layer do not depend on the sodium silicate content. For the "cast iron – liquid glass filler" system, a sodium silicate content of 12–14 g per 100 g of sand is recommended, and for the "steel – liquid glass filler" system – 14–16 g. The obtained results allow using the liquid glass filler as an effective substitute for part of the metal in cast modules of protective and load-bearing structures.

Keywords

Cast composite materials; lost foam casting; cast iron and steel casting; liquid glass mixture; penetrability; transition layer; functional filler; residual strength.