

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»

Зав. кафедрою МЛВ

к.т.н. доцент

_____ Олександр КУЗИК

“ _____ ” _____ 202__ року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем
вищої освіти

на тему

**«Підвищення ерозійної стійкості поверхонь піщано-глинистих
ливарних форм оптимізацією складу формувальної суміші»
«Increasing the erosion resistance of surfaces of sand and clay casting
moulds by optimising the composition of the moulding mixture»**

Виконала здобувачка вищої освіти:

II курсу, групи ПМ-22Мз-1

ОПП «Прикладна механіка»

спеціальності 131 Прикладна механіка

_____ Кузик М.О.

Керівник роботи:

к.т.н. доцент _____ Віктор ЛОМАКІН

Рецензент: _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

Рівень вищої освіти _____ магістр _____

Галузь знань _____ 13 Механічна інженерія _____

Спеціальність _____ 131 "Прикладна механіка" _____

Освітньо-професійна програма «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувача кафедри _____

к.т.н. доцент, Олександр КУЗИК

“ _____ ” _____ 202_ року

**ЗАВДАННЯ НАКВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ
(МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ
ОСВІТИ**

Кузик Марина Олександрівна

1. Тема роботи: "Підвищення ерозійної стійкості поверхонь піщано-глинистих ливарних форм оптимізацією складу формувальної суміші"

2. Керівник роботи Ломакін Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент

Затверджені наказом вищого навчального закладу від "04"серпня 2023 року № 20-13

3. Строк подання роботи до захисту "29" грудня 2023 року _____

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи.

Метою роботи є розробка формувальних піщаних сумішей, що забезпечують підвищену ерозійну стійкість ливарних піщаних форм для отримання необхідної якості виливків.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні задачі:

1. Проаналізувати основні причини ерозійного руйнування ливарних піщаних форм та виявити фактори, що впливають на їх інтенсивність.

2. Розробити методику оцінки ерозійної стійкості піщаної ливарної форми.

3. Вибрати основні методи визначення фізико-механічних властивостей піщаних формувальних сумішей.

4. Виявити основні фактори, що впливають на ступінь ерозійного руйнування ливарної піщаної форми.

5. Провести експериментальні дослідження ерозійної стійкості піщаної ливарної форми з використанням розробленої формової суміші.

5. Перелік ілюстративного матеріалу . на 12 слайдах

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	доц., Віктор ЛОМАКІН		
Розділ 2	доц., Віктор ЛОМАКІН		
Розділ 3	доц., Віктор ЛОМАКІН		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1	02.10	
2	Розділ 2	23.10	
3	Розділ 3	04.12	
4	Графічний матеріал	28.12	

Дата видачі завдання

«7» 09 2023 року

Керівник роботи

_____ Віктор ЛОМАКІН

Завдання прийнято до виконання

«_____» _____ 2023 року

_____ Марина КУЗИК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційну магістерську роботу виконав здобувач вищої освіти Кузик Марина Олександрівна студентка II курсу, групи ПМ-22Мз-1, ОПП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка на тему "Підвищення ерозійної стійкості поверхонь піщано-глинистих ливарних форм оптимізацією складу формувальної суміші", яка складається з пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу. Пояснювальна записка містить 67 сторінок тексту, формату А4, 31 рисунка, 7 таблиць. Кваліфікаційна магістерська робота присвячена підвищення ерозійної стійкості поверхонь піщаних ливарних форм оптимізацією складу формувальної суміші.

Встановлено, що основною причиною ерозійного руйнування ливарної піщаної форми, є низька якість вихідних формувальних матеріалів, що використовуються для приготування формувальних і стрижневих сумішей, а також низька якість виготовлення форм. Існуючі методи оцінки ерозійного руйнування піщаних ливарних форм технічно складні для реалізації та малочутливі. Розробка простих, універсальних та достовірних методів визначення ерозії форми має велике практичне значення.

Запропонована методика визначення фізико-механічних властивостей піщаних формувальних сумішей. Розроблено методику оптимізації складу формувальної піщаної суміші та ступінчаста технологічна проба з складною зубчастою поверхнею, що дозволяє якісно оцінити ерозійну стійкість ливарних піщаних форм.

Показано, що змінюючи вміст шлікеру в піщаній суміші в межах 5...25%, при постійному вмісті зв'язуючого рідкого скла 7%, суміш змінює свої фізико-механічні властивості, а саме: збільшується міцності у сирому стані, зменшується міцність на розтяг у сухому стані та знижується газопроникність, що дає можливість рекомендувати шлікер, як добавку для надання піщаної суміші ерозійної стійкості, а розроблену суміш вважати ерозійностійкою.

Підібрані оптимальні склади ерозійностійкої суміш з добавкою шлікеру, що складається з кварцового пісок – 80%, шлікер – 20%, рідкого скла – 13%.

Розроблена суміш має міцність у сирому стані 0,15 МПа, в сухому стані 3,0 МПа, низьку осипуваність = 0,001% та негативну деформацію 0,5% через 20 с.

Експериментально встановлено, що розроблена суміш має найбільшу ерозійну стійкість, ерозія якої становить $E_f = 0,012\%$ в порівнянні з ерозією форм, що виготовлені з ПГС та рідко скляної.

На підставі комплексних теоретичних та експериментальних досліджень встановлено взаємозв'язок властивостями формувальних сумішей та утворенням поверхневих дефектів та ерозійною стійкістю. Визначено оптимальні параметри цих властивостей.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розплав, форма, суміш, структура, властивості, виливок, ерозія.

ABSTRACT

The qualifying master's work was completed by the higher education recipient Marina Oleksandrivna Kuzyk, a student of the II year, group PM-22Mz-1, OPP "Applied Mechanics" specialty 131 Applied Mechanics on the topic "Increasing the erosion resistance of the surfaces of sand-clay foundry molds by optimizing the composition of the molding mixture" from an explanatory note and illustrative material. The explanatory note contains 67 pages of text, A4 format, 31 figures, 7 tables. The qualifying master's thesis is devoted to increasing the erosion resistance of the surfaces of sand casting molds by optimizing the composition of the molding mixture.

It has been established that the main cause of erosional destruction of foundry sand molds is the low quality of the initial molding materials used for the preparation of molding and core mixtures, as well as the low quality of the molds. The existing methods for evaluating the erosional destruction of sand casting molds are technically difficult to implement and are not very sensitive. The development of simple, universal and reliable methods for determining shape erosion is of great practical importance.

The method of determining the physical and mechanical properties of sand

forming mixtures is proposed. A technique for optimizing the composition of the molding sand mixture and a stepped technological test with a complex toothed surface have been developed, which allows for a qualitative assessment of the erosion resistance of foundry sand molds.

It is shown that by changing the content of slicker in the sand mixture within the range of 5...25%, with a constant content of binding liquid glass of 7%, the mixture changes its physical and mechanical properties, namely: the strength in the wet state increases, the tensile strength in the dry state decreases state and the gas permeability decreases, which makes it possible to recommend the slipper as an additive to give the sand mixture erosion resistance, and to consider the developed mixture as erosion resistant.

The optimal composition of the erosion-resistant mixture with the addition of schlicker, consisting of quartz sand - 80%, schlicker - 20%, liquid glass - 13%, was selected. The developed mixture has a strength in the wet state of 0.15 MPa, in the dry state of 3.0 MPa, low crumbling = 0.001% and negative deformation of 0.5% after 20 s.

It was experimentally established that the developed mixture has the highest erosion resistance, the erosion of which is $E_f = 0.012\%$ in comparison with the erosion of forms made of PGS and rare glass.

On the basis of complex theoretical and experimental studies, the relationship between the properties of molding mixtures and the formation of surface defects and erosion resistance was established. The optimal parameters of these properties have been determined.

KEY WORDS: melt, form, mixture, structure, properties, casting, erosion.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	8
РОЗДІЛ 1 ВЛАСТИВОСТІ ФОРМУВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ ТА ОЦІНКА ЕРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЛИВАРНИХ ФОРМ.....	11
1.1 Поверхнєве руйнування піщаних ливарних форм у процесі заливання розплаву.....	11
1.2 Зв'язок ерозії ливарної форми з поверхневими дефектами виливків.....	14
1.3 Методи оцінки ерозійної стійкості піщаних ливарних форм.....	27
1.4 Обігрів та теплоізоляція прибутків, як спосіб збільшення ерозійної стійкості піщаної ливарної форми.....	37
Висновки по першому розділу, мета і завдання досліджень.....	39
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФОРМУВАЛЬНИХ ПІЩАНИХ СУМІШЕЙ ТА ЕРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЛИВАРНОЇ ФОРМИ.....	40
2.1 Вибір складів формувальних сумішей.....	40
2.2 Визначення фізико-механічних властивостей піщаних формувальних сумішей.....	41
2.2.1 Дослідження вологості піщаних сумішей.....	41
2.2.2 Дослідження газопроникності.....	41
2.2.3 Методика дослідження міцності піщаної суміші на стиск.....	42
2.2.4 Методика визначення обсипуваності ливарної піщаної форми.....	42
2.3 Методика визначення ерозійної стійкості форми.....	43
2.3.1 Оцінка ерозії піщаної ливарної форми за ступінчастою пробою.....	44
2.3.2 Оцінка ерозії піщаної ливарної форми по зубчастій пробі.....	45
Висновки до другого розділу.....	46
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФОРМУВАЛЬНИХ ПІЩАНИХ СУМІШЕЙ ТА ЕРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ПІЩАНИХ ФОРМ.....	47
3.1 Формувальна піщана суміш з відходами керамічного виробництва.....	47
3.2 Дослідження фізико-механічних властивостей піщаних сумішей.....	49
3.3 Дослідження фізико-механічних властивостей піщаної суміші залежно від вмісту зв'язуючого.....	53
3.4 Дослідження впливу типу зв'язуючого на ерозійну стійкість ливарної форми.....	56
Висновки до третього розділу.....	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	64
Список використаних джерел.....	65

ВСТУП

Інтенсивність технічного розвитку ливарного виробництва, об'єми та необхідна якість випуску продукції, змушують ливарників на іншому рівні вирішувати питання технології виготовлення виливків. Досвід роботи ливарних заводів показує, що одним із перспективних шляхів підвищення якості лиття, зниження його собівартості є розробка нових формувальних сумішей, удосконалення існуючих технологічних процесів та способів виготовлення виливків. Наразі найбільш поширеним є спосіб отримання виливків у піщаноглинястих формах. Але, одним з характерних недоліків даного способу лиття є низька якість поверхні одержуваних виливків. А саме, поверхня та середина (під шаром металу) виливків ушкоджена піщаним засміченнями, які розташовуються як на поверхні виливків. Зниження даного браку виливків досягається за допомогою використання високоякісних та ретельно підготовлених формувальних матеріалів; впровадженням автоматизованого контролю та управління процесами приготування формувальних та стрижневих сумішей; впровадженням сучасних способів формоутворення для досягнення необхідної якості форми з достатньою ерозійною стійкістю; впровадженням заходів внутрішньоформового рафінування розплаву та зниженням металоємності форми.

На сьогоднішній день піщані суміші з високою ерозійною стійкістю, а також сам механізм ерозійного руйнування ливарної форми мало вивчені. Розробка таких сумішей, а також заходів спрямованих на захист форми від руйнування потоком металу при заливанні, вдосконалення технології ливарної форми - є першорядним завданням для отримання в умовах вітчизняного ливарного виробництва стабільної якості лиття при отриманні виливків.

Слід зазначити, що навіть виконання багатьох заходів не дозволяє виключити дефекти виливків з вини ливарної форми, оскільки процеси руйнування поверхні піщаної форми маловивчені, а наявні знання і досвід

недостатній для повного представлення процесів, що протікають в поверхневих шарах форми при контакті з розплавленим металом.

Для всебічного вивчення процесів руйнування піщаної ливарної форми під час заливання у роботі пропонується запровадити розширене поняття «Ерозія ливарної форми». Ерозія ливарної форми - це комплекс фізико-хімічних процесів руйнування ливарної форми потоком рідкого розплаву, що рухається, внаслідок деструкції сполучного формувальної суміші і деформації поверхневих шарів ливарної форми. Суть узагальненого поняття "ерозія ливарної форми" полягає в тому, що воно охоплює всі процеси, що відбуваються в ливарній піщаній формі під час заливання розплаву, і розкриває причину виникнення ливарних дефектів під дією тепла, гідродинамічних сил та інших факторів. До дефектів від ерозійного руйнування поверхні ливарної піщаної форми прийнято відносити лише піщані забруднення, забруднення від відшарування форми, а також дефекти від руйнування антипригарного покриття. У зв'язку з цим, у магістерській кваліфікаційній роботі спроба виконати акцент на практичну сторону вирішення цього питання. Великий науковий та практичний інтерес становлять дослідження процесів ерозійного руйнування ливарної піщаної форми. Їх поява, причини та пошук заходів та технологічних прийомів, що знижують або виключають ерозію ливарної форми.

У зв'язку з розглянутими вище зауваженнями щодо якості виливків, одержуваних у піщані ливарні форми, підвищення якості форми, її ерозійної стійкості та розробка заходів та технологічних заходів у цьому напрямі є актуальними.

Метою роботи є розробка формувальних піщаних сумішей, що забезпечують підвищену ерозійну стійкість ливарних піщаних форм для отримання необхідної якості виливків.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні задачі:

1. Проаналізувати основні причини ерозійного руйнування ливарних піщаних форм та виявити фактори, що впливають на їх інтенсивність.
2. Розробити методику оцінки ерозійної стійкості піщаної ливарної форми.

3. Вибрати основні методи визначення фізико-механічних властивостей піщаних формувальних сумішей.

4. Виявити основні фактори, що впливають на ступінь ерозійного руйнування ливарної піщаної форми.

5. Провести експериментальні дослідження ерозійної стійкості піщаної ливарної форми з використанням розробленої формової суміші.

Об'єкт дослідження – процес підвищення фізико-механічних властивостей піщаних формувальних сумішей оптимізацією їх складу.

Предметом дослідження – закономірності впливу складу формувальної піщаної суміші на ерозійну стійкість поверхонь ливарних форм та якість деталей виготовлених методом лиття.

РОЗДІЛ 1

ВЛАСТИВОСТІ ФОРМУВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ ТА ОЦІНКА ЕРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЛИВАРНИХ ФОРМ

1.1 Поверхнєве руйнування піщаних ливарних форм у процесі заливання розплаву

Якість виливка формується з моменту надходження розплаву у форму. Вважається, що при литті в піщані форми, джерелом засмічень, газових раковин, що утворюються у виливках здебільшого є сама ливникова система [1, 2, 5, 6, 18, 22]. У процесі заповнення форми поверхнєві шари каналів, і форма зазнають значних теплових і динамічних навантажень, а саме температура заливання сплаву, характер його течії, тривалість заливки та ін. Відомо, що при взаємодії розплаву з поверхнею форми, вона миттєво досягає температури контакту, і в результаті теплового удару в стінці форми виникає температурний перепад, який поряд з іншими факторами визначає величину напруження у приповерхневих шарах форми, що є однією з основних причин руйнування форми [3, 4, 6, 8]. У разі її низької термостійкості йде пряме розміщення тонкого поверхневого шару через деструкцію сполучного, що полегшує змивання розплавом частинок суміші, що звільнилися, і піску. При подальшому прогріванні в спечених шарах форми починаються деформаційні процеси, утворюються тріщини, які при тривалій заливці можуть бути розвинені, і відбуватиметься інтенсивніше ерозія поверхні. В результаті ерозійних процесів можуть утворитися засмічення, просічки (дефект у вигляді невисоких прожилок на поверхні виливки, що виникли внаслідок затікання металу в тріщини на поверхні форми або стрижня), деформація і пригар. Досягненням необхідної стійкості ливарної форми під час заливки зрештою визначає отримання якісної виливки.

У процесі розвитку технології виготовлення форми було вирішено питання якісного ущільнення суміші із забезпеченням високих фізико-механічних властивостей. Сучасні методи ущільнення із застосуванням

повітряного імпульсу дозволяють отримати бездоганну ливарну форму для дрібного та середнього лиття за високої продуктивності автоматичних ліній. Досягнуті параметри форми якості відбитка, міцності, поверхневої твердості дають можливість знизити негативні фактори, що сприяють руйнуванню поверхні форми і ливникової системи під час заливки. Основною умовою досягнення таких показників є високоякісні вихідні матеріали, а також застосування систем автоматичного управління процесами підготовки суміші, дозування складових і приготування формувальних сумішей. Дії інших основних факторів: температури, хімічного складу сплаву, гідростатичного тиску величини близькі до постійної та можуть бути подолані підбором необхідних властивостей форми.

Більшість вітчизняних ливарних виробництв поки що не зуміло провести переозброєння. Залишаються процеси виготовлення піщаних форм пресуванням та струшуванням на застарілому устаткуванні, що не дозволяє отримати якісну форму. Те саме стосується приготування сумішей та якості матеріалів, що застосовуються. Мало приділяється уваги питанням підготовки відпрацьованої суміші, автоматизації контролю та приготування. Відомо, що реальна форма у цих умовах має низьку поверхневу міцність, нестабільна за щільністю, має високу деформаційну здатність та низьку термостійкість [61,92,96]. Таке становище визначає високий загальний шлюб виливків з вини форми, у тому числі за засміченнями - приблизно 50-60%, з газових раковин близько 20%, з пригару до 10%. Крім того, підприємства зазнають великих збитків за витратами на обрубні та очисні операції та виправлення дефектів.

Недостатня поверхнева міцність піщаної ливарної форми, наведено виливок «Корпус» відцентрового насосу (рис. 1.1) зі слідами піщаного засмічення на поверхні.

Як правило, механізм антипригарної дії формувальних фарб полягає в ізолюючому ефекті вогнетривкого інертного наповнювача, поліпшенні структури пор поверхневого шару форми, просоченого компонентами суспензії і збільшення його термоміцності і ерозійної стійкості. Поліпшена ерозійна

стійкість забарвленої форми визначається низькою деформаційною здатністю покриття та високою міцністю зчеплення пов'язаного фарбою шару з підкладкою.

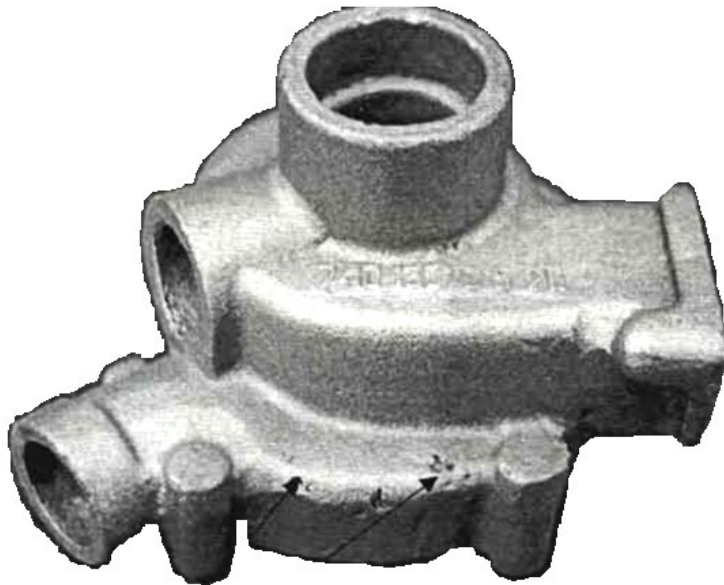


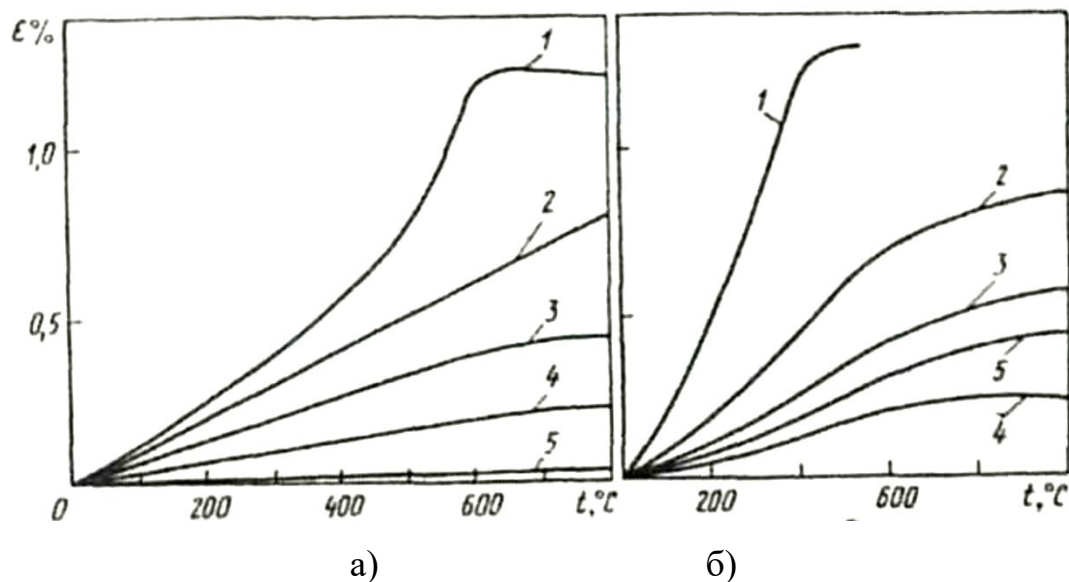
Рисунок 1.1 – Дефекти піщаного засмічення на поверхні виливки "Корпус"

Відомим способом збільшення стійкості ливарної форми є заливання в сухі та підсушені форми, але він витісняється в дрібносерійному та серійному виробництві використанням форм із холоднотвердіючих сумішей на фенольних смолах.

Іншим напрямом підвищення ерозійної стійкості форм є використання процесів із зміною принципів її зміцнення. Конкурентоспроможними в даний час є вакуумно-плівкове формування. Воно вважається особливо ефективним при виробництві протяжних, складних виливків із чавуну та сталі. При цьому відношення маси залитого металу до маси наповнювача форми повинно бути мінімальним для досягнення теплофізичних та економічних параметрів процесу. Як результат, сталеві виливки з вуглецевих та легованих сталей виходять з гарною поверхнею, вільні від традиційних дефектів, пов'язаних із засміченнями та газовими раковинами.

1.2 Зв'язок ерозії ливарної форми з поверхневими дефектами виливків

Ерозія піщаної форми залежить від її стійкості та обумовлена зниженням поверхневої міцності в результаті порушення адгезійних зв'язків, капілярних, електричних або інших сил, що діють між наповнювачем та сполучною в ущільненому стані. Ерозійна стійкість визначається, насамперед, властивостями самої ливарної форми: поверхневою міцністю, вологістю, пористістю, термостійкістю, деформаційною здатністю та ін. Термостійкість та деформаційна здатність форми поряд з міцністю та іншими властивостями є важливими параметрами, що впливають на характер руйнування ливникової системи у процесі заливання. Термостійкість форми складається насамперед з термостійкості наповнювача, зв'язуючого, тобто граничної температури, при якій починається термічна або термохімічна деструкція [8], і комплексу властивостей, які визначають здатність форми протистояти руйнуванню та спотворенню геометричних розмірів, а саме міцнісні та реологічні властивості матеріалів у холодному та гарячому стані. Висока термостійкість форми забезпечує підвищену ерозійну стійкість [4]. Деформаційна здатність характеризує властивість поверхневих шарів форми змінювати свій об'єм при тепловому впливі рідкого металу та пов'язана безпосередньо з процесами тепломасопереносу, структурними та фазовими перетвореннями в ущільненій суміші. Деформація форми в процесі заливання обумовлює виникнення напружень у приповерхневих шарах каналів ливникової системи, що викликає утворення тріщин, а вони сприяють утворенню ужимін. Таким чином, висока деформаційна здатність форми, що насамперед залежить від теплового розширення пісків, знижує її ерозійну стійкість (рис. 1.2).



1 – кварц; 2 – олівін; 3 - хроміт; 4 - циркон; 5 – плавлений кварц

Рисунок 1.2 – Вільне теплове розширення пісків залежно від температури нагріву: а – нагрівання з пічкою; б – термоудари при 100 °С;

За вільним розширенням наповнювача можна судити про схильність відповідних сумішей до термічних напружень і пов'язаних з ним дефектів. Основним фактором, що впливає на величину напружень, що виникають у формі, є коефіцієнт α наповнювача і деформація нагрітої суміші ϵ_t . З графіків 1.3 видно, що при повільному нагріванні найменше теплове розширення має плавлений кварц, проте при випробуваннях відповідних реальної заливки ливарної форми, при термоударі, цирконовий пісок має найменший коефіцієнт температурного розширення, так як поліморфних перетворень не зазнають при нагріванні.

Відомо [16], що ущільнена піщано-глиниста суміш розширюється в процесі прогрівання та основні зміни об'єму відбуваються у перші 5...20 секунд. Лінійне розширення сягає 1,7% (рисунок 1.3).

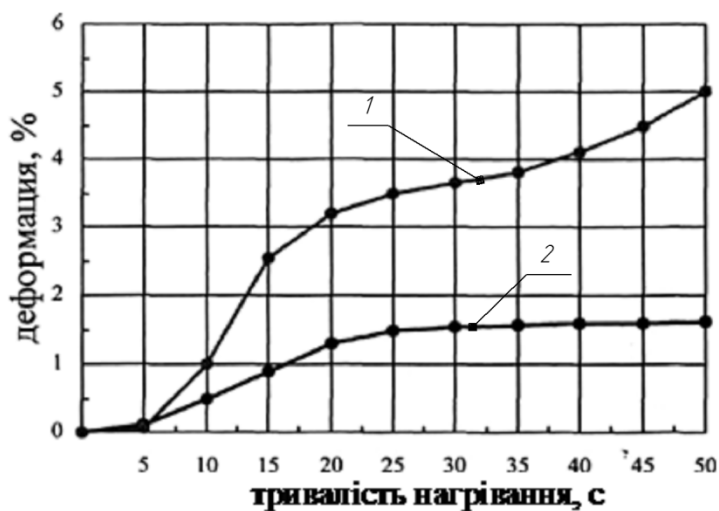


Рисунок 1.3 – Залежність величини деформації зразків піщано-глинистої суміші (ПГС) від тривалості нагрівання при температурі 1273 К:

1 - зразки без навантаження; 2 – зразки при навантаженні 0,4 МПа.

З графіка рисунок 1.3 можна бачити, що зразки ПГС без навантаження (крива 1) і при навантаженні 0,4 МПа, що відповідає умовам навантаження в реальній формі (крива 2) в перші 5 сек. деформуються незначно та його деформація (ϵ) становить (0,2-0,3%). При подальшому нагріванні зразки без навантаження (крива 1) зазнають більшої деформації, ніж під навантаженням (крива 2) та її величина зростає з часом. Зразки під навантаженням мають меншу деформацію, так як навантаження, що додається, стримує розширення суміші. У піщаній ливарній формі, її позитивна деформація призводить до виникнення та розвитку ерозії форми. Величина деформації залежить від прикладеного навантаження і температури нагрівання.

Виникаючі при деформації напруження викликають руйнування поверхневі шари форми. Вони сприяють утворення та відшаровування скоринок, що обумовлює формування ужимін під час заповнення робочої порожнини розплавом. Відокремлені від форми частинки є засміченням. Показано, що критерієм схильності суміші до утворення ужимін приймалося взаємне розташування кривих вільного розширення суміші при нагріванні та деформації суміші під руйнівним навантаженням при даній температурі [84]. Чим більша різниця між розширенням та деформацією, тим більше схильність суміші до утворення ужимін (дефект у вигляді поглиблення з пологими краями, заповнена

формувальним матеріалом та прикритого шаром металу; утворюється внаслідок відшарування формувальної суміші при заливанні) (рис. 1.5).

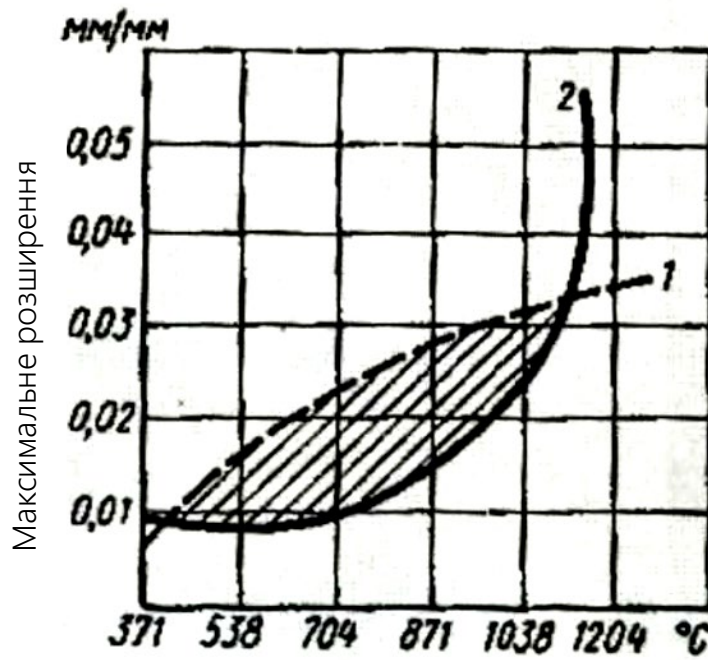


Рисунок 1.4 – Залежність розширення (1) та деформація (2) від температури суміші

На рисунку 1.4 наведені дані щодо розширення (1) та деформації (2) при високих температурах суміші, схильної до утворення ужимін. Чим більша площа фігури, замкнутої між двома кривими (заштрихована площа), тим більше схильність суміші до утворення ужимін. Інтервал температур між двома точками перетину кривих є інтервалом найбільш ймовірної освіти ужимін і як наслідок розвитку вторинної ерозії.

Крім схильності наповнювача піщаної суміші до поліморфних перетворень з подальшим збільшення обсягу, зниження ерозійної стійкості сприяють: підвищена вихідна вологість суміші, низька міцність форми в зоні конденсації води, нерівномірне ущільнення суміші (неякісне виготовлення форми), високий тиск газів .

Під дією теплоти металу при заливанні відбувається інтенсивна взаємодія розплаву з формою, деструкція поверхневого шару форми, її деформування, відрив від масиву суміші частинок, що звільнилися, і перенесення їх потоком рідкого металу з утворенням засмічень виливків.

Засори у виливках є найбільш поширеними дефектами при отриманні виливків піщано-глинисті форми. Засув - дефект у вигляді формувального матеріалу, захопленого потоком рідкого металу і впровадженого в поверхневий шар виливки. Частинки та їх конгломерати можуть бути розмірами від часток міліметра до кількох сантиметрів. Засори в невеликих обсягах безпосередньо не порушують геометрію та товарний вид виливки, проте вони можуть бути джерелами інших прихованих дефектів. Часто засмічення є концентраторами напруги, що призводить до утворення тріщин і снюканню експлуатаційних властивостей виливків. Необхідно розрізняти три основні види засмічення: неметалеві включення, шлакові раковини і, власне, засмічення від формувальних сумішей.

Неметалічні включення – дефект у вигляді неметалевих частинок, що потрапили в метал механічно або утворилися внаслідок хімічної взаємодії компонентів під час розплавлення та заливання металу. Це продукти взаємодії компонентів сплавів з атмосферою, з неметалевими домішками, розміри яких вимірюються мікронами. Такі включення є предметом вивчення металознавців.

Шлакові раковини – це забруднення виливків у вигляді несущільностей у виливках заповнених частинками шлаків, флюсів, продуктів модифікування, легування, лігатури, що не прореагувала, і ін. Даний вид включень вноситься у форму розплавом під час заливки або утворюється в процесі внутрішньоформної металургійної обробки. Характерною особливістю утворення таких включень є те, що вони не пов'язані з технологією виготовлення та якістю форми.

Засмічення від формувальних сумішей – це включення у вигляді несущільностей заповнених частинками формувальних сумішей, вогнетривких матеріалів або іншими продуктами термохімічної взаємодії цих матеріалів з рідким металом. Частинки та конгломерати суміші внесені через живильники ливникової системи та розподілилися потоком металу на верхній поверхні порожнини форми. Причинами виникнення дефектів стали неякісне оформлення лійки, стояка, неякісне складання форми і неефективна шлаковловлююча

система. Подібні дефекти можна поділити на кілька видів. Усі вони утворюються усередині форми.

Засмічення у вигляді великих включень зазвичай розташовуються в нижній частині порожнини форми, утворюються внаслідок неякісного складання або неправильно виконаного оснащення. Часто такий вид засмічення класифікують як обвал форми чи стрижня. Руйнування форми або стрижня може статися в процесі заливання через їх неякісний ремонт або неправильно виконану вентиляцію. Дрібні частки зруйнованої форми виринають і відносяться потоком розплаву від місця утворення. Вони можуть знаходитися в будь-якій частині виливки за напрямком заповнення форми навпроти живлення виливки (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Засмічення у вигляді великих включень, виливок "Муфта"
Сталі 25Л масою 70 кг

Засмічення від «обгару» форми утворюються в процесі заливання великих виливків, особливо типу плит великої товщини. Таке явище у повній мері досліджено професором Рижиковим А.А. [1]. Практика останніх років підтвердила, що ливарники, які працюють у цехах із дрібносерійним виробництвом коли, якість форми низька (застосовується ручне виготовлення), постійно стикаються з цими проблемами.

Засмічення у вигляді кірок - це характерний дефект, що утворюється в результаті руйнування форми з відшаруванням пластинок частинок, що спеклися. товщиною 2...5 мм. Дефект пов'язаний з утворенням ужимін через

недостатньої термостійкості форм, що надалі розвивається за рахунок повного відділення скорінок, що відшарувались. Подібний дефект може утворитися при руйнуванні та відшаруванні антитипригарного покриття, товщина такої скоринки 0,5...1 мм.)

Показано, що через 8...10 с. після появи металу у формі починається падіння окремих піщаних зерен, що відриваються від поверхні верхньої напівформи – первинна ерозія. Засмічення у цьому випадку утворюється у вигляді дрібних включень формувального піску. Застосування високоякісних матеріалів, підбір необхідних властивостей (вологості та міцності) та при достатньому ущільненні формувальної суміші такий дефект виключається. За більшої металоємності через 15...40 с. після початку заливки від поверхні верхньої напівформи може відокремитися шар завтовшки від 3 до 8 мм. Частки, що відокремилися, і скоринки формувальної суміші підхоплюються розплавом, піднімаються до верхньої межі порожнини форми, притискаються до неї і утворюють суцільний або місцевий дефект у вигляді хаотичного засмічення, полон, скорінок вписаних в тіло виливки. Товщина такого дефекту може сягати 20 мм і залежить від інтенсивності та часу теплового впливу на верхню напівформу. Процес відшарування може повторюватися кілька разів, що слід класифікувати, як вторинна ерозія.

Часто осередком засмічень від ерозії форми є неякісно виконана ливникова воронка, стояк і ливниково-живильна система (ЛЖС), що примикає до неї (рис.1.6).



Рисунок 1.6 - Частина стояка та ливниково-живильної системи виливки
«Корпус»

На рис. 1.6 яскраво виражені наслідками ерозійного руйнування дросельного переходу, що примикає до стояка, і шлаковловлювача. У зламах шлаковловлювача видно частинки зруйнованої форми. На об'єм утворення засмічень, а також ужимін (величину ерозії) впливають склад і властивості формувальних матеріалів. Крім того, впливає металоємність і швидкість заповнення форми, якість ущільнення, шорсткість поверхні, геометрична бездоганність виконання каналів, температура розплаву, турбулентність потоку, висота падіння струменя при заливці, тривалість заливки та ін. Саме швидкість заповнення або потужність струменя розплаву є першопричиною. полягають у відриві незв'язаних з масивом форми або мають недостатній зв'язок піщинок.

Показано, що потужність струменя залежить від висоти падіння струменя і від площі поперечного перерізу струменя. Інші величини постійні. Якщо потужність струменя досягає критичного значення, а напрямок струменя не збігається з віссю стояка, тобто ймовірність розмиву стінок каналів, тобто утворення первинної ерозії. Потужність струменя може визначатися характером руху розплаву у формі. Турбулентна течія посилює ерозійні процеси, які супроводжуються відривом піщинок з поверхні ливарної форми з утворенням наростів і закінчується утворенням засмічень у виливку, якщо вони не затрималися в каналах ливниково-живильної системи.

Швидкість спливання піщинок, що відірвалися, можна описати рівнянням Стокса:

$$v_{\text{вкл.}} = 2 \sqrt{\frac{d_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{м}} - \rho_{\text{п}}}{3c} \cdot g}$$

де c - коефіцієнт опору (приймають рівним 1), $d_{\text{п}}$ - піщинки приймають рівним 0,002 м; $\rho_{\text{п}}$ - щільність піщинок в межах 1200...800 кг / м³; $\rho_{\text{м}}$ - щільність розплаву; g - прискорення вільного падіння 9,81 м/с.

Швидкість спливання піщинки залежить від її діаметре і від різниці щільностей розплаву та матеріалу піщинки. Імовірність спливання піщинки (засмічення) в каналах ливниково-живильної системи залежить від його конструкції, довжини та швидкості руху розплаву.

При турбулентному русі частина засмічень проникає у робочу порожнину форми. Ламінарна течія характеризується малою потужністю струменя і як наслідок набагато меншою ймовірністю утворення первинної ерозії, але не виключає її особливо при малій міцності ливарної піщаної форми. Тривале заповнення ливарної форми призводить до її перегріву і за деяких умов може призвести до утворення ужимін та подальшої ерозії.

Відомий та досконало вивчений механізм утворення ужимін [1,4-8, 10, 61]. Встановлено, що виникнення цього дефекту залежить від геометричної форми виливків, від особливостей технологічного процесу виготовлення форми. Виливки з великими плоскими поверхнями схильні до утворення ужимінів, а заливка форм у похилому положенні зменшує ймовірність їх утворення.

Фактично їх освіта йде у взаємодії з розплавом і відомо, що основною причиною освіти ужимін є:

- значне розширення поверхневого шару форми при швидкому нагріванні;
- розширення зерен кварцового піску при переході з модифікації в β ;
- усадка глини при висиханні та навантаженні, в результаті цього відбувається порушення суцільності поверхні форми;
- зростання тиску газів усередині форми.

Всі перелічені фізико-хімічні процеси, що протікають у піщаній формі, призводять до відшаровування окремих ділянок форми. Подальший розвиток ужимін (переміщення скоринки, що відшарувалась), утворення засмічень, є наслідками ерозії ливарної піщаної форми. Очевидно, відшаровування відбуватиметься у зоні з мінімальною міцністю. Є підстави вважати, що такою зоною мінімальної міцності буде зона конденсації вологи, що виникає при односторонньому нагріванні форми. Методи визначення міцності у зоні конденсації вологи чи «мочною» міцності докладно викладені в [61]. Необхідно зауважити, що за деякими даними, наприклад [79], при використанні сирих піщано-бентонітових сумішей ужимін утворюється при досягненні в зоні конденсації 10-14% вологості.

Залежність міцності в сирому стані суміші (1) і міцності зони конденсації (2) від вихідної вологості піщано-бентонітових сумішей наведена на рисунку 1.7.

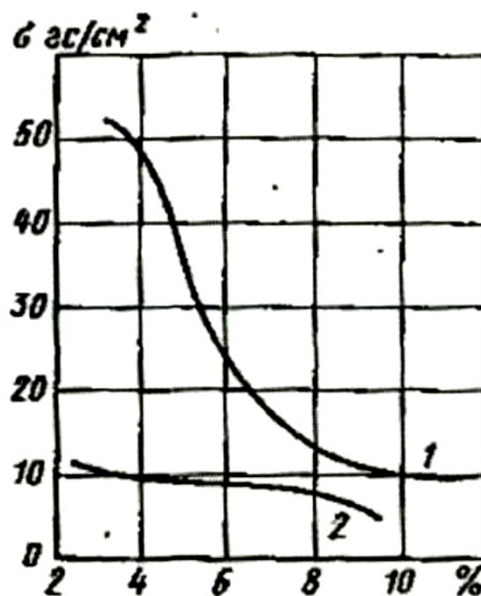


Рисунок 1.7 – Залежність міцності у сирому стані (1) та у зоні конденсації (2) від вологості.

При вихідній вологості понад 4,5% сира міцність різко зменшується та наближається до міцності в зоні конденсації, зміни при збільшенні вихідної вологості незначні. За даними роботи [18], зона конденсації тим ширша, чим менше температурний градієнт у формі та менше вихідна вологість суміші.

Відстань до зони конденсації можна розрахувати за формулою квадратного кореня:

$$h_k = k_h \sqrt{\tau},$$

де τ – час в с;

k_h коефіцієнт для піщано-бентонітових сумішей при 1300 °С дорівнює 0,080...0,125 см/с^{0,5}.

Аналізуючи формулу можна зробити висновок, що час є основним чинником, що впливає ширину зони конденсації.

При сухих або безводних сумішах утворення у формі зони мінімальної міцності буде пов'язано з іншими складнішими процесами. Тому утворення ужимін у таких випадках пов'язують не з розширенням, а зі значною усадкою поверхневого шару [18]. При певних конкретних умов таке уявлення про механізм утворення ужимін цілком реальним.

У певних умовах на поверхнях виливків у місцях розриву або відшарування поверхневих шарів (кірок) форми, які викликані одностороннім нагріванням сирової піщано-глинистої форми та її одночасним розширенням [7], що призводить до розтріскування, утворюються дефекти як наростів металу. Якщо ужаміни представляють собою нарости, частково відділені від тіла виливки формувальним матеріалом скоринок, що відшарувалися, і після їх видалення утворюється на поверхні поглиблення з пологими краями, то в деяких випадках на виливках наріст не виникає. За певних умов утворюються виступи, складки або поглиблення залежно від умов та ступеня деформації поверхневого шару форми або стрижня.

Виступи на виливках можуть мати ступінчасту форму, якщо виникають в результаті повного або часткового відділення тих, хто відшарувався скоринок і переміщення їх потоком розплаву (рис. 1.8).

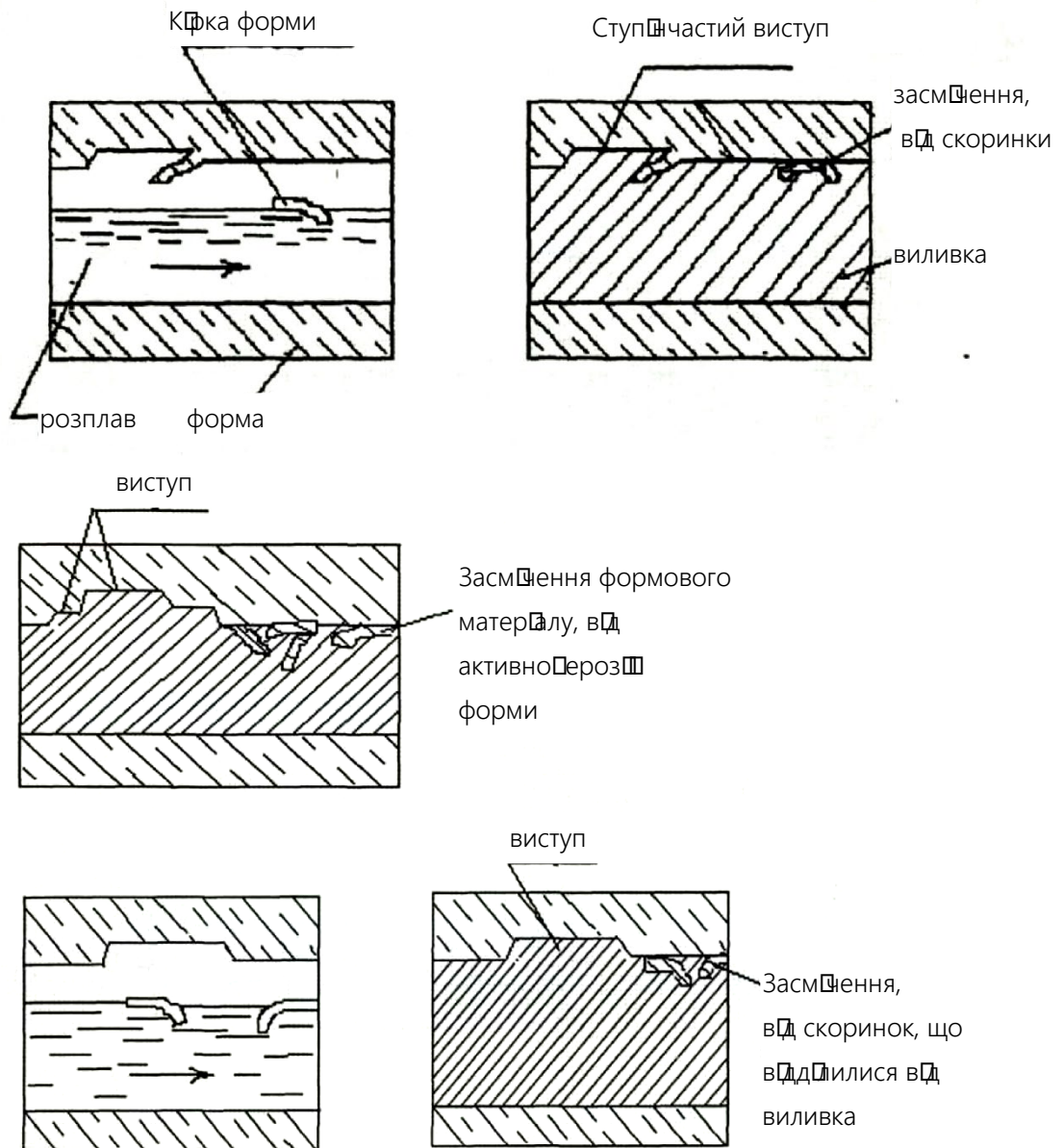


Рисунок 1.8 – Механізм утворення ужимін у вигляді виступів та засмічень на виливку в процесі заповнення форми:

- а – виступ з односторонньою складкою ужиміни та утворення пісочної раковини (засмічення від кірочки форми, що відокремилася);
- б – утворення виступу та засмічення в результаті ерозії форми; в – подвійне пошарове руйнування поверхні форми з відділенням скоринки, їх переміщення рухомим розплавом і утворення засмічень від активної ерозії у процесі заповнення.

Умовою утворення первинної тріщини в поверхневому шарі при утрудненому розширенні виражається як $\sigma_t \geq \sigma_{згин}$, де σ_t – термічне напруження, а

$\sigma_{\text{згин}}$ – міцність сухого шару на згин. У свою чергу міцність сухого шару на вигин дорівнює:

$$\sigma_t = \frac{E_t \times \alpha}{1 - \mu} \times (t - t_0),$$

де E модуль пружності при даній температурі;

α – температурний коефіцієнт лінійного розширення;

t та t_0 – температура середовища та температура нагріву в зоні напруг;

μ – коефіцієнт Пуансона.

З формули випливає, що можливість утворення тріщини в поверхневому шарі піщаної форми тим менше, чим більше модуль пружності формувальної суміші, чим менше температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу наповнювача піщаної форми і менше різниця температури середовища та температури нагріву в зоні напруг (температурний градієнт). При лиття в міцні форми з висушених або холоднотвердіючих сумішей у них також можливе утворення ослабленої зони конденсації за рахунок випаровування пов'язаної та вільної води та продуктів деструкції компонентів сполучного при досить великій тривалості заливки. Механізм утворення дефектів такий самий [7], відповідно визначальними є ті самі термомеханічні властивості.

Поверхнєве покриття знижує ерозію форми, але й воно саме в процесі заливки зазнає впливу рідкого металу і може зруйнуватися при недостатній стійкості, коли не забезпечені необхідна міцність і хороше зчеплення покриття з підкладкою [6].

У свою чергу ерозія поділяється на первинну та вторинну. Як правило, первинна ерозія зачіпає поверхню форми і призводить до утворення у виливку засмічення, який потрапляє з ЛЗ або є наслідком руйнування формотворчої поверхні виливки. Він вважається допустимим, якщо, не впливає на її якість.

Процеси утворення ужимін можуть відбуватися і після остаточного заповнення форми, коли розплав ще знаходиться в рідкому стані поблизу її поверхні. При заливці масивних виливків шар, що первинно закристалізувався в умовах різкого переохолодження, знову розплавляється під впливом теплоти

рідкого металу, що знаходиться в центральних зонах. У цьому випадку за час тривалого остигання виливки процеси відшарування частини форми можуть відбутися багаторазово, що призводить до повного руйнування поверхневого шару, утворення множинних ужимін, перенесення відшарованих частинок і утворенню значних засмічень, що класифікується, як вторинна ерозія. Тому зразки засмічень та ужимін необхідно розглядати як наслідок ерозійних процесів та враховувати їх.

Вивчення ерозійних процесів та оцінка стійкості піщаної ливарної форми у процесі заливання є важливими заходами при отриманні якісного лиття, а також при розробці заходів щодо виключення наслідків низької ерозійної стійкості форми.

1.3 Методи оцінки ерозійної стійкості піщаних ливарних форм

У більшості випадків причини утворення засмічень у виливках пов'язують із властивостями формувальних та стрижневих сумішей. Якщо виключити можливість випадкового попадання неметалевих частинок у форму і недбалість при обробці та складанні форм, то причиною засмічення можуть бути мала стійкість форми проти механічного впливу металу, що протікає (ерозійна стійкість) і її недостатня термостійкість [4, 6, 7, 10] (здатність тривале час витримувати високі температури, не руйнуючись). Певною мірою ці характеристики оцінюють по механічній міцності поверхневих шарів форми або зразків з досліджуваних формувальних сумішей. У реальних умовах характер взаємодії форми та розплавленого металу – це складний комплекс фізичних та хімічних процесів, що протікають одночасно. При цьому завжди важливо знати ділянку форми, яка більшою мірою піддається ерозії, і шляхи перенесення неметалевих частинок металом при заповненні форми. Цьому присвячено багато досліджень у цій галузі. Підвищений інтерес до явища ерозії піщаної форми у процесі заливання в минулому столітті свідчить про те, що ця проблема вирішується повільно і є актуальною і зараз.

Існує кілька методів вивчення процесів ерозії піщаної форми у процесі заливання. Найточнішим до сьогодні вважається метод радіоактивних ізотопів. Він найбільш універсальний і дозволяє отримати повну картину ерозії форми [18, 19].

При виготовленні форми суміш вводять радіоактивний ізотоп будь-якого елемента. Після затвердіння та охолодження виливки вивчають розподіл у ній засмічень за допомогою радіографування або лічильника. При виборі ізотопу прагнуть до того, щоб останній мав достатню β -активність, тому що від цього залежить роздільна здатність методу; період напіврозпаду ізотопу повинен бути більшим для можливості тривалої роботи з ним. Бажано, щоб ізотоп можна було перевести у водний розчин для змішування з водою, яка використовується при приготуванні суміші. Це сприяє найбільш рівномірному розподілу ізотопу по всьому об'єму суміші. Ізотоп має бути нейтральним по відношенню до суміші та не впливати на її властивості. Активність ізотопу має бути досить низькою для безпечного з ним поводження.

Автори роботи [23] для досліджень застосовували ізотоп фосфору, що переводиться у водний розчин H_3PO_4 , нейтралізований нашатирем. Схема розташування активованої ділянки у формі визначається місцем дослідження (рис.1.9).

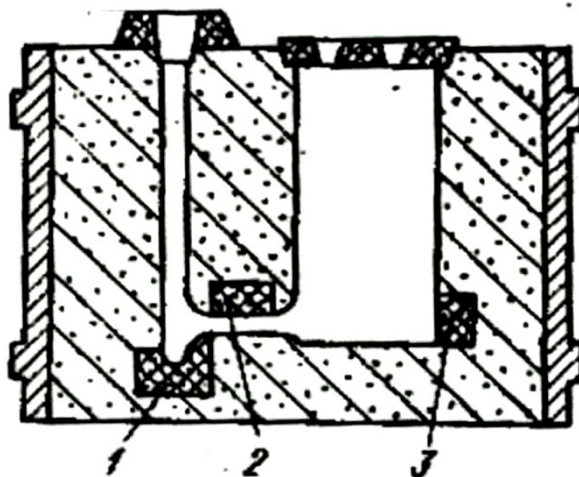


Рисунок 1.9 – Схема розташування ізотопів

На рисунку 1.9 показано розташування ділянок з ізотопами для вивчення впливу удару струменя (1), розмиваючої дії струменя (2) та процесу осипання

форми (3). Стрижні з радіоактивними ізотопами виготовляли із суміші 100 ваг. ч. кварцового піску, 7 ваг. ч. рідкого скла та 4 ваг. ч. води, в яку додавали радіоактивний розчин H_3PO_4 (3% ваги води).

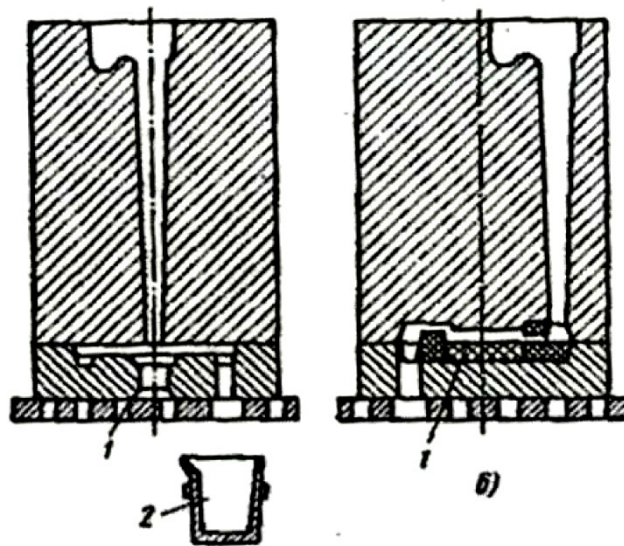
Отриманий дослідний виливок у вигляді прямокутного паралелепіпеда вагою 30 кг розрізали на пластини і з них знімали авторадіограми на рентгенівській плівці XX з витримкою тривалістю 4 доби. Таким чином, вивчали розподіл неметалевих включень за обсягом виливки.

При дослідженні дії рідкої сталі, що розливає, на стінки каналів ливникової системи використовували виливки плити 500x250x50 мм [74]. У горизонтальні канали ливникової системи встановлювали стрижні-втулки, виготовлені з формувальної суміші з радіоактивним ізотопом. Після остигання у формі верхню поверхню виливки очищали від суміші, що пристала, і на неї накладали рентгенівську плівку XX, поміщену в касети з світлонепроникного паперу. Тривалість експозиції – 5-7 днів.

Таким чином, метод «радіоактивних ізотопів» має обмеження за випробуваними сумішами та умовами проведення випробувань, зокрема погано підходять для піщано-олійних, смоляних та інших сумішей даного класу. А дослідження займають тривалий час і часто не дають збіжності результатів.

За інших досліджень метал заливали у форми з цирконового піску з добавкою радіоактивного цирконію. З поверхні виливки після очищення піску знімали метал шарами по 0,07 мм і робили авторадіографування. Таким чином, метод радіоактивних ізотопів дозволяє встановити джерело виникнення засмічення та розташування їх у тілі виливки. Недоліками методу радіоактивних ізотопів є необхідність додаткових заходів з техніки безпеки, пов'язаних з використанням радіоактивних елементів, великий термін одержання кінцевих результатів (4 діб і більше), труднощі рівномірного розподілу радіоактивного елемента в безводних сумішах (піщано-олійних, фуранових) тощо. Тому у багатьох випадках ливарникам простіше застосовувати інші методи, використовуючи різні технологічні проби. Однією з таких є проба Шренявського

(рис 1.10) призначена вивчення впливу удару струменя металу на поверхню форми [15].



1 – контрольний стрижень; 2 – ківш

Рисунок 1.10 – Проба Шренявського: а - схема встановлення контрольного стрижня під стояк б - схема встановлення контрольних стрижнів у формі

Під стояком (рис. 1.10 а) в різних ділянках ливникової системи (рис. 1.10 б) встановлюють контрольні стрижні 1, через ливникову систему протягом заданого часу заливають певну кількість металу в ківш 2. За чіткістю відбитка металу, що залишається в ливниковій системі після закінчення заливки, можна судити про ерозійну стійкість суміші. По суті такий самий метод, але з іншою кількісною оцінкою ерозійної стійкості суміші описаний у роботі [15] (рис. 1.11).

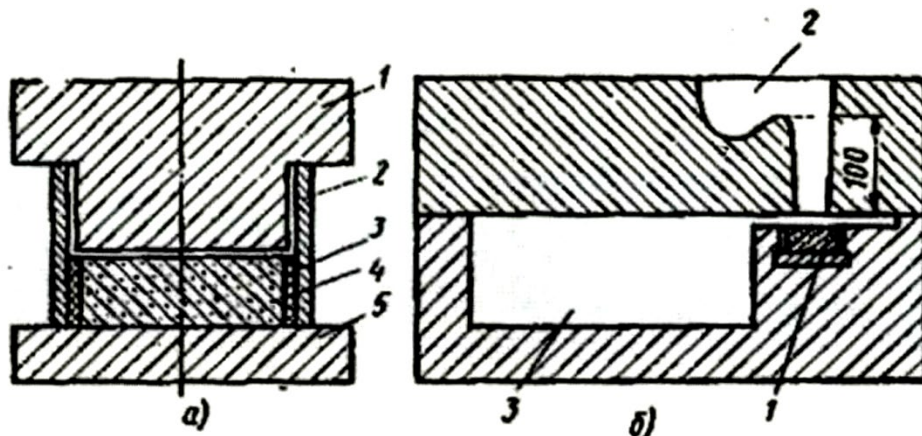


Рисунок 1.11 – а) - виготовлення зразка, 1 – фасонна головка, 2 – кільце зовнішнє, 3 – циліндр сталевий, 4 – зразок випробуваної суміші, 5 – плита сталева; б) – схема випробування суміші на стійкість проти розмивання рідким металом: 1 – випробуваний зразок, 2 – стояк, 3 – металоприймач.

Зразок 4 суміші (рис. 1.11, а) ущільнювався в сталевому циліндрі 3 діаметром 75 мм і заввишки 25 мм. Циліндр поміщали у зовнішнє кільце 2 кілька більшого діаметра і встановлювали на сталевій плиті 5 стискався фасонною головкою 1 до зіткнення з крайкою зовнішнього кільця. Після цього голівку та зовнішнє кільце видаляли, а надмірну суміш зчищали. Вагу зчищеної суміші віднімали з початкової ваги зразка для визначення ваги суміші, що залишилася в циліндрі 3.

В експериментальну форму (рис. 1.11 б) встановлювали зразок 1 суміші з циліндром та сталеву плиту. Форму через стояк 2 заливали чавуном, який руйнував зразок у результаті ерозійного впливу розплаву, зменшуючи вагу та займаючи його обсяг, у всіх випадках приварювався до циліндра. Після очищення виливки дробом циліндр заповнювали сумішшю. Враховуючи поправку на ущільнення, різниця між вагою вихідного зразка і вагою суміші в порожнині циліндра після заливки характеризувала розмив зразка металом.

Недоліком даного методу є його мала чутливість - через недостатню величину зразка. Однак при ємність металоприймача 25 кг наведена характеристика ерозійної стійкості суміші разом з іншими технологічними пробами (наприклад, з пробой Шренявського) може дати кількісне уявлення про динамічний вплив струменя рідкого металу на форму.

Не менший інтерес представляє оцінка ерозії форми за величині шорсткості контрольної виливки. Відомо, що ерозія форми є причиною підвищеної шорсткості поверхні та поганого товарного виду виливків.

У роботі [19] для дослідження впливу властивостей та складу сумішей на шорсткість поверхні виливків застосовували пробу, наведену на рисунку 1.12.

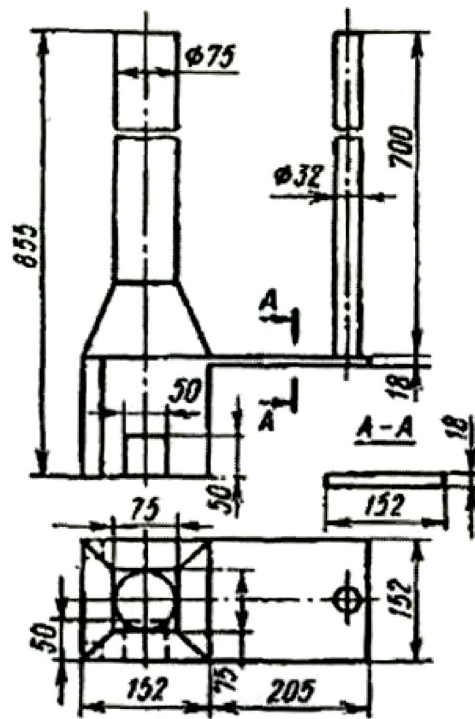


Рисунок 1.12 — Розміри проби вивчення ерозії.

Контрольними поверхнями в цій пробі (рис. 1.12) є щілинний живильник, виступ на дні проби у вигляді куба 50 x 50 x 50 мм і виступи в кутах нижньої частини проби розміром 25 x 25 x 155 мм. Для порівняльної оцінки шорсткості литої поверхні розробили спеціальну дев'ятибальну шкалу еталонів [17]. Ця методика дозволяє лише візуально оцінювати ерозію. Кількісну оцінку ступеня ерозії форми проводять за зміною маси горизонтальної ділянки ливникової системи живлення.

Застосування щілинних елементів у конструкції технологічних проб для дослідження ерозійної стійкості формувальних сумішей цілком виправдане з погляду гідравліки заповнення форми. Дійсно, чим більший периметр контрольної ділянки проби при тій же площі поперечного перерізу, тим більше тертя між формою та металом і тим сильніший ерозійний вплив струменя металу. Для більшого впливу розплаву, для чутливості проби, необхідна достатня його кількість, тому що занадто великий периметр живильника, при недостатній масі металу, що проливається через нього сприяє збільшенню ерозійної стійкості живильника – проби. Живильник необхідно розраховувати відповідно до маси необхідної для випробування металу. Тому щілинноподібну

контрольну ділянку можна зустріти і в деяких інших пробах. На рисунку 1.13 представлена проба із щілинним елементом 127 x 100 x 9 мм [17].

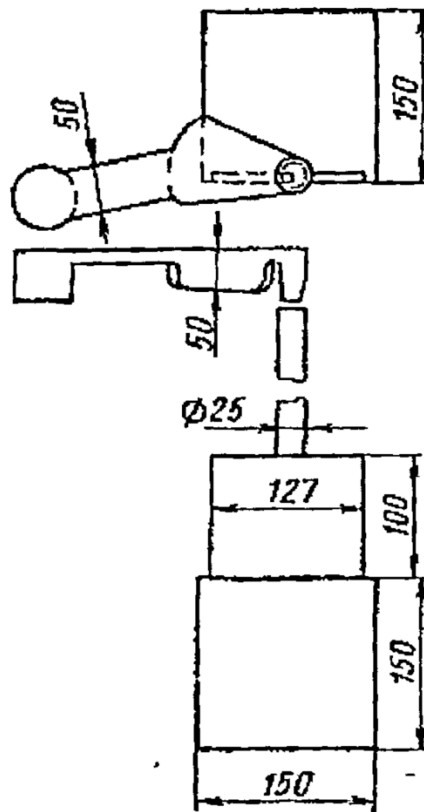


Рисунок 1.13 – Технологічна проба з щілинним елементом вивчення ерозії форми

В даному випадку, мірою ерозії форми було прийнято зміна маси металу на одиницю поверхні щілинного елемента після піскоструминної обробки. Збільшення ваги контрольної ділянки відповідало вимиванню суміші у процесі заливання. За допомогою цієї проби вдалося встановити вплив на ерозію форми різних технологічних факторів: міцності сухої суміші, діаметра та висоти стояка тощо, що свідчить про достатню чутливість проби.

Але слід зазначити, то чим менше наведена товщина (ставлення площі до периметра поперечного перерізу), тим за інших однакових умов швидше охолоджується виливок, і на поверхні проби може утворитися скоринка затверділого металу, яка захищатиме форму від динамічного впливу металу, що протікає. Особливо це явище буде помітно при вивченні дії, що розмиває, щодо тугоплавких сплавів з вузьким інтервалом затвердіння. Отже, при виборі методу

необхідно враховувати форму та розміри проби, що значною мірою відповідають реальним умовам виробництва.

Великі можливості вивчення впливу розплаву на ерозію форми представляє метод падаючого струменя [18]. Метод заснований на визначенні часу повного руйнування зразка від впливу на його поверхню розплаву (рис. 1.14).

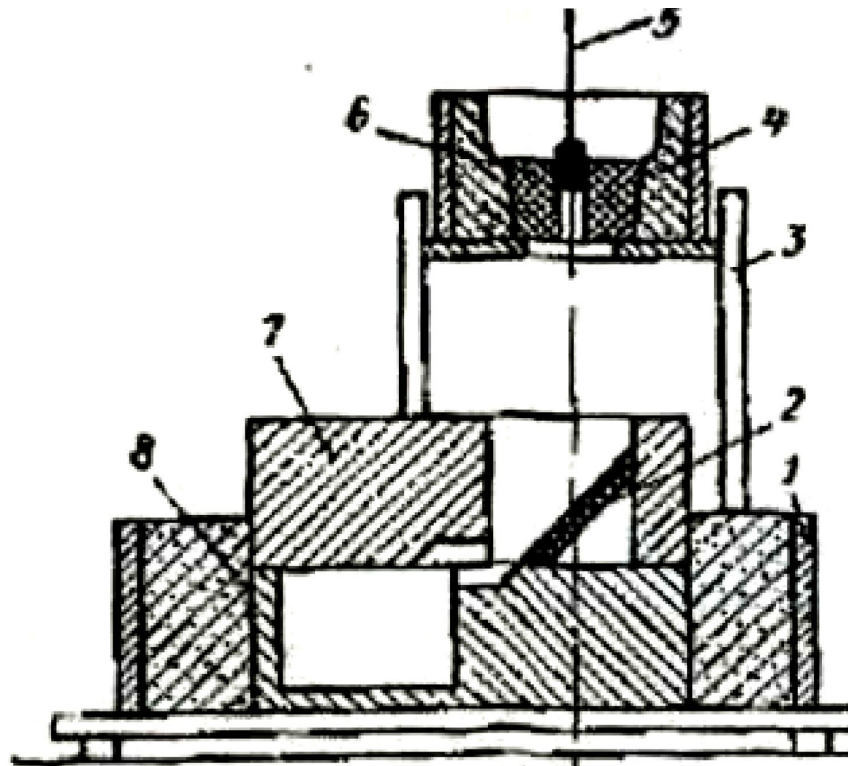


Рисунок 1.14 – Схема установки вивчення ерозії при падінні струменю розплаву під кутом

Метод реалізується наступним чином, у опоку 1 (рис. 1.14) заформовують стрижні 8 і 7; перший служить резервуаром для зливу металу, другий – для встановлення випробуваного плоского стрижня під необхідним кутом. Над стрижнями на стійках 3 укріплена невелика опок 4 із заформованим у ній стрижнем 6, що має отвір, що забезпечує постійну витрату розплаву (2,2 кг/с), при цьому отвір перекривається пробкою 5. Метод охоплює кінетику руху розплаву, а також механізм теплового впливу на зразок, що наближає його до реальних умов взаємодії розплаву – піщана ливарна форма. В цілому чутливість проби визначається залежністю якості поверхні від кута падіння струменя розплаву (рис. 1.15).

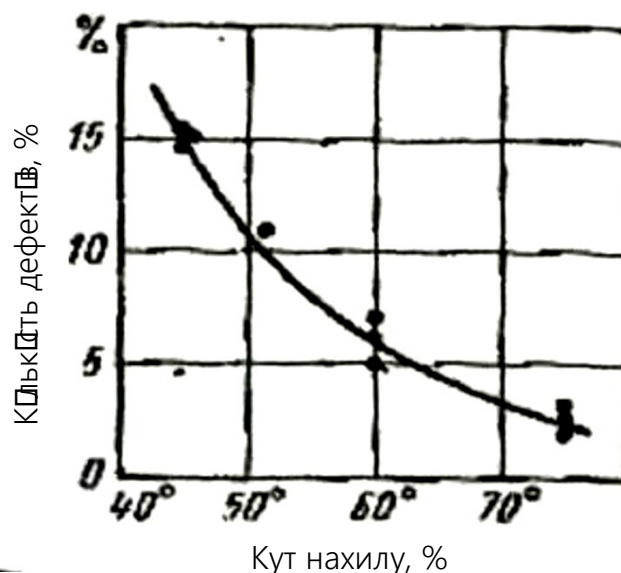


Рисунок 1.15 – Залежність якості поверхні від кута падіння струменя розплаву

З графіку (рис. 1.15) видно, що чим більше кут нахилу до струменя падаючого металу, чим більша площа їх контакту, тим менша руйнація зазнає зразка за той самий час. Однак цей метод оцінки ерозії є непрямим. У роботі відзначено низьку збіжність результатів через велику кількість факторів, що впливають на проведення дослідження ерозії ливарної форми (температура розплаву, кут установки зразка, якість поверхні зразка, висота струменя розплаву). Як правило, дослідники визначали не ерозію форми, а механізм утворення ужимін, котрі безпосередньо пов'язані з процесами ерозійної руйнації.

Слід зазначити, що для з'ясування природи утворення ужимін, як першопричини ерозії ливарної піщаної форми, важливо знати поведінку формувальних сумішей при швидкому нагріванні до високих температур.

Один з методів, що полягає в обливанні зразка розплавом, дозволяє з'ясувати поведінку суміші при контакті з рідким металом. Для цієї мети використовується напівкругла проба (рисунок 1.16).

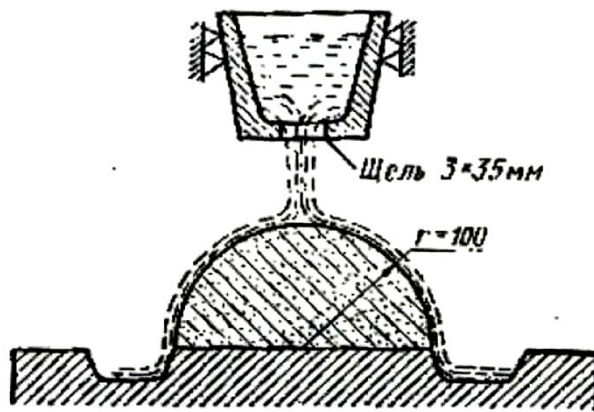


Рисунок 1.16 – Схема дослідження обливання напівкруглої проби розплавом

Метод дослідження полягає у виливанні певної порції рідкого чавуну при температурі 1400 °С на технологічну пробу. При цьому розплав повністю скочується зі сферичної частини проби, що дає можливість після дослідження візуально оцінити стан поверхні проби.

Таблиця 1.1 – Час руйнування поверхневого шару напівкруглої проби при обливанні її розплавом

Складові суміші	Вологість, %	Тривалість обливання проби розплавом, с
Пісок кварцовий К 0315	5,0	4
	7,3	12
Бентоніту 2%, пеку 0,5 %	6,4	16
Бентоніту 2%, пеку 1 %	6,5	35

З даних таблиці 1.1, методу обливання напівкруглої проби металом, можна бачити якісно однакову схильність суміші до утворення ужимін, тобто опосередковано оцінює схильність піщаної форми до руйнування при взаємодії з рухомим розплавом.

Таким чином, існуючі методи оцінки піщаної суміші до ерозійного руйнування дозволяють опосередковано оцінити схильність суміші до ерозійного руйнування (за розподілом у виливки радіоактивних ізотопів, руйнування малочутливого зразка і т. д.). Розглянуті методи технічно складно, а

деяких випадках і небезпечно здійснити практично без спеціального устаткування й підготовки.

Перелічені методи відображають механізм утворення ужимін, але в реальній формі спостерігається розвиток утворених тріщин, відшарування їх на значну відстань, відрив і перенесення частинок рухомим розплавом. Це процес ерозії і він тісно пов'язаний із деформаційними явищами у формі. Методи малочутливі в оцінці ерозійних процесів руйнації.

Розробка простих, універсальних та достовірних методів визначення ерозійної стійкості форми, встановлення зв'язку між фізико-механічними властивостями суміші та ерозійними процесами дозволить виявляти причину появи дефектів, прогнозувати їх появу, а значить знайти і заходи боротьби, та підвищити якість одержуваних виливків.

1.4 Обігрів та теплоізоляція прибутків, як спосіб збільшення ерозійної стійкості піщаної ливарної форми

Відомо, що одним з радикальних шляхів підвищення ерозійної стійкості піщаних ливарних форм є зниження їх металоємності [11, 16, 18]. Насьогодні у середньому під час використання звичайних прибутків вихід придатного лиття становить приблизно 60 %. Таке становище є значною мірою наслідком недосконалості існуючих способів живлення виливків у процесі кристалізації. Так, наприклад, у процесі заливання форм, температура рідкого металу виливки і прибутку, розташованої над вузлом живлення, в початковий момент часу практично однакова, тобто початковий температурний градієнт металу в системі прибуток - виливок дорівнює нулю. У цьому випадку більш повільне охолодження металу прибутку, порівняно з металом вузла тіла, що живиться, виливки досягається за рахунок більшої маси прибутку.

Існує багато різних способів ефективного живлення кристалізуючих виливків з прибутку. Деякі з них, наприклад, електрошлаковий підігрів, потребують спеціального обладнання. Інші, наприклад, обігрів термітними та

термоізоляційними сумішами не відрізняються стабільністю процесу, тому що для ефективної роботи даної суміші потрібно суворе дотримання температури заливки у вузькому інтервалі, так як спосіб заснований на інтенсивному виділенні тепла в процесі взаємодії гарячого металу прибутку та складових суміші. Склад складових екзотермічної суміші підбирають залежно від необхідної розрахункової температури займання, яку в реальних умовах ливарного цеху складно витримати в заданих межах. Тому, в деяких випадках екзотермічна реакція починається раніше часу і суміш вигоряє, коли метал прибутку і вузла живлення ще перегрітий або реакція починається пізніше встановленого часу, коли питомий вузол і прибуток вже закристалізувалися. Застосування теплоізоляційних сумішей є найбільш реальним економічним заходом зниження маси прибутків, а значить зниження маси залитого у форму металу.

Теплоізоляція прибутків сумішами на основі екологічно чистих сучасних теплоізоляційних сумішей – є перспективним способом підвищення ефективності живлення виливків у процесі кристалізації для усунення дефектів пов'язаних з усадкою металу. Теплоізолюючі суміші дозволяють усунути недоліки характерні для інших сумішей такого типу, так як вони зберігають температуру металу в прибутку і підтримують його в рідкому стані з моменту заливання форми до кінця затвердіння виливки [13, 14, 17].

При використанні методу теплоізоляції прибутків підвищується ефективність їхньої роботи. Теплоізоляція металу прибутку сприяє уповільненню відведення тепла і, як наслідок, збільшує час роботи прибутку. У цьому розмірі прибутку може бути зменшено у два і більше разів, без зниження ефективності роботи. Якщо теплоізоляція ефективна, а прибуток розрахована точно, то теоретично можна досягти результатів повного використання її об'єму живлення. Залишок від прибутку, можливо, можна порівняти з припуском на механічну обробку.

Завдяки зменшенню розміру прибутку знижується витрата металу на прибуток, збільшується вихід придатного, зменшується площа поверхні різання

для видалення прибутку, знижується трудомісткість обрубних робіт. В цілому, зниження металоємності форми зменшує ерозійні процеси, що протікають у піщаній формі, і тим самим підвищується якість одержуваних виливків.

Висновки по першому розділу, мета і завдання досліджень.

1. Аналіз проблеми ерозійної стійкості поверхонь піщаних ливарних форм показав, що розробка формувальних сумішей для виготовлення ливарних форм із підвищеною стійкістю до ерозійного руйнування є необхідним завданням для виготовлення якісних фасонних виливків.

2. Встановлено, що основною причиною ерозійного руйнування ливарної піщаної форми, є низька якість вихідних формувальних матеріалів, що використовуються для приготування формувальних і стрижневих сумішей, а також низька якість виготовлення форм.

3. Існуючі методи оцінки ерозійного руйнування піщаних ливарних форм технічно складні для реалізації та малочутливі. Розробка простих, універсальних та достовірних методів визначення ерозії форми має велике практичне значення.

4. Ефективним технологічним заходом підвищення ерозійної стійкості піщаних ливарних форм, зниження їх металоємності рахунок зменшення маси прибутків та розробка та застосування формувальних сумішей з підвищеними фізико-механічних властивостями.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФОРМУВАЛЬНИХ ПІЩАНИХ СУМІШЕЙ ТА ЕРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЛИВАРНОЇ ФОРМИ

2.1 Вибір складів формувальних сумішей

Процес ерозійного руйнування поверхні піщаних ливарних форм, як говорилося вище, залежить від фізико-механічних, термомеханічних та ін. властивостей формувальних і сполучних матеріалів, що використовуються для приготування формувальних сумішей та виготовлення ливарних форм. У свою чергу формувальні суміші повинні мати необхідні технологічні та робочі властивості. Вони повинні мати певну вологість, газопроникність, міцність, осипуваність, теплопровідність, деформаційну здатність, ерозійну стійкість. Для обґрунтування механізму ерозійного руйнування поверхні ливарної форми розплавом під час її заповнення були обрані різні широко застосовувані формувальні суміші (склад та властивості наведені в таблиці 2.1).

Таблиця 2.1 – Склад та властивості дослідних сумішей

№	Склад суміші, (мас.%)	Властивості сумішей					
		Вологість, %	Газо- проникніс- ть, од.	Міцність на стиск у вологодому стані, МПа	Міцність на стиск, через 1 годину, МПа	Міцність на стиск у затверділому стані, МПа	Оси- паємість, %
1	ПГС кварцовий пісок – 10; горіла суміш – 80 глина – 3,0 загальний вміст глини – 16 крохмаліт – 0,2 регенерат – 6,8	3...5,0	120	0,08...0,12		Через 24 години 3,0...3,5	
2	Рідкоскляна з тепловим сушінням кварцовий пісок - 88% глина - 5% РС - 7%		200	0,01-0,015	0,5-0,8	>3,0 на розрив	0,01

Фізико-механічні властивості визначали за наступними загальноприйнятими методиками, а також застосовували новостворені методи дослідження.

2.2 Визначення фізико-механічних властивостей піщаних формувальних сумішей

2.2.1 Дослідження вологості піщаних сумішей.

Дослідження вологості сумішей виконували згідно з (ГОСТ 23409.5-78) нормальним методом. Метод заснований на знаходженні втрати маси навішування суміші після висушування при 105...110 °С до постійної маси.

Від проби суміші, відібраної для випробування, взяли навіску масою 50 г і помістили в попередньо висушену керамічну чашу. Чашу поміщали в сушильну шафу при 105...110 °С. Сушили на протязі 30 хв. після чого зважували. Кожне подальше зважування проводили після висушування протягом 15 хв. до постійної маси. Після остаточного висушування навішування суміші охолоджували в ексікаторі та зважували. Випробування проводили паралельно на двох навісках. Масову частку води (X) обчислювали за формулою, %:

$$X=2 \cdot (m_1-m_2), \quad (2.1)$$

де m_1 , m_2 – відповідно, маса чаші з навішуванням суміші до і після висушування, г.

2.2.2 Дослідження газопроникності.

Метод визначення газопроникності (ГОСТ 23409.6-78) заснований на визначенні здатності зразка пропускати через себе повітря при випробуванні вологих, сухих та затверділих формувальних сумішей.

Для визначення газопроникності вологої суміші з неї готували зразки в нероз'ємній металевій гільзі з внутрішнім діаметром (50±0,025) мм, висотою 50 мм, ущільнюючи їх за допомогою лабораторного копра трикратним ударом вантажу, що падає масою (6,35±0,25) мм (50±0,025) мм. Через даний зразок

пропускали 2000 см³ повітря. Для визначення газопроникності використовували формулу:

$$\Gamma = \frac{2000 \cdot 5}{3,14 \cdot \left(\frac{5}{2}\right)^2 \cdot P \cdot t} = \frac{509,5}{P \cdot t},$$

де Γ – газопроникність суміші, од.;

P – тиск повітря перед зразком, см. вод. ст.;

t – час, протягом якого через зразок пройшло 2000 см³ повітря, хв.

Зазначимо, що газопроникність прийнято позначати в умовних одиницях. За даною методикою можна вимірювати газопроникність в межах 0...2000 одиниць, але для більшості формувальних сумішей не перевищує 400 одиниць, що для апіщано-глинястих сирих сумішей є задовільним.

Для визначення газопроникності сухого зразка зразки готували аналогічно, а потім сушили в умовах, що відповідають вимогам, передбаченим нормативно-технічною документацією, на конкретні матеріали та суміші. Охолоджували на повітрі.

Готові зразки мали встановлену ГОСТ висоту (50±0,8) мм, яку контролювали трьома ризиками, нанесеними на станині та штоку копра. Випробування проводили на трьох зразках.

2.2.3 Методика дослідження міцності піщаної суміші на стиск.

Визначення міцності на стиск, розтягування та зріз регламентує (ГОСТ 23409.7 - 78), який ґрунтується на визначенні опору зразка при додатку до нього відповідного навантаження. Зразки готували за ГОСТ 23409.6 - 78, потім поміщали у відповідний пристрій для визначення міцності і результати випробування фіксували за показаннями приладу.

2.2.4 Методика визначення обсипуваності ливарної піщаної форми.

Метод визначення обсипуваності (ГОСТ 23409. 9-78) заснований на визначенні величини втрати маси суміші в сирому, висушеному або в стані затвердіння при терті його стінки сітчастого барабана.

Для проведення випробування застосовували спеціальний прилад, який забезпечує обертання барабана діаметром 110 мм горизонтальній площині з частотою обертання $(60 \pm 0,5)$ об/хв. Стінки барабана виготовлені із сітки № 2,5 за ГОСТ 3826 – 82. Для проведення випробувань зразки готували за ГОСТ 23409.6 – 78, зважували, та поміщали в центральну частину барабана. Барабан обертався за допомогою механічного приводу, при випробуваннях сирих зразків – протягом 30 с, сухих протягом однієї хвилини. Після чого барабан зупиняли, зразок витягували і знову зважували. Осипуваність (X) обраховували за формулою:

$$X = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100\%$$

де m , m_1 – маса зразка до та після випробування відповідно, г.

За результат випробування приймали середнє арифметичне результати трьох паралельних визначень.

Визначення деформаційної здатності необхідна, оскільки вона характеризує властивість приповерхневих шарів форми змінювати свій об'єм при тепловому впливі рідкого металу та пов'язана безпосередньо з процесами тепломасоперенесення, структурними та фазовими перетвореннями в ущільненій суміші.

2.3 Методика визначення ерозійної стійкості форми

Основними факторами, що впливають на ступінь ерозії, є температура заливання, металостатичний тиск, характер гідродинамічного впливу струменя металу на форму, а також фізико-механічні властивості сумішей. Теоретична кількісна оцінка багатфакторних процесів зазвичай не піддається розрахункам, але оптимальні параметри можуть бути обрані на підставі експериментальних досліджень, максимально наближених до умов, що відбуваються в реальній ливарній формі.

Оцінка ерозійної стійкості піщаної ливарної форми може бути проведена візуально за станом поверхні елементів ливникової системи та виливків, і за величиною зміни їх геометричних розмірів після заливання. Більш точну оцінку можна зробити за допомогою спеціальних методів та технологічних проб.

2.3.1 Оцінка ерозії піщаної ливарної форми за ступінчастою пробою.

Робота над створенням оригінальної методики якісної (візуальної) та кількісної оцінки стійкості форм проти ерозії проводилася у кілька етапів. Спочатку визначали ступінь ерозійного руйнування форми після заливання, використовуючи розроблену ступінчасту пробу, параметри моделі розробленої технологічної проби представлені рисунку 2.1.

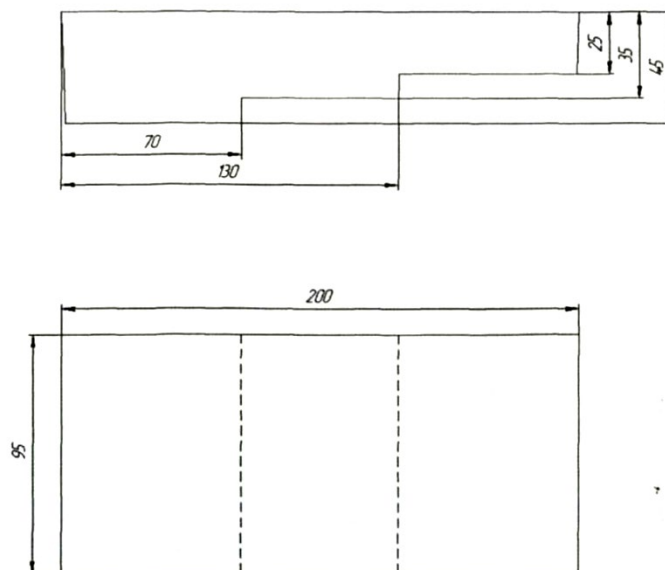


Рисунок 2.1 – Параметри ступінчастої проби

Порівняльні випробування проводилися із заливанням проб масою 5,1 кг сталлю 35Л при температурі 1560 °С. Заливання проводилося металом з однієї плавки у два прийоми по формах, виготовленими із застосуванням досліджуваних сумішей. Склади та властивості сумішей представлені в таблиці 2.1 (ПГС - піщано-глиниста суміш та дослідна рідинноскляна з шлікером, з тепловою сушкою).

Шлікер на відмінну від активної глини є відходами виробництва керамічних виробів і в своєму складі містить: кварцовий пісок та польовий шпат – 84,6% та глинисту складову – 15,4 %

Шлікер є дрібнодисперсною добавкою, що є відходом і містить у своєму складі багато інертних складових, які збільшують термостійкість суміші. Шлікер, як передбачається, повинен забезпечувати достатні для формувальних піщаних сумішей фізико-механічні властивості, а також малу шорсткість поверхні ливарної форми, а також збільшення поверхневої міцності і як наслідок підвищення ерозійної стійкості на всіх етапах заливання ливарної форми розплавом. Попередньо ерозійну стійкість форм оцінювали візуально за її поверхнею після вилучення виливків-проб до і після очищення металевої щіткою.

2.3.2 Оцінка ерозії піщаної ливарної форми по зубчастій пробі.

Універсальна зубчаста технологічна проба являє собою плиту 200 x 100 x 45 мм з тонкими загостреними виступаючими ребрами, що мають формувальний кут і призначені для створення умов імітації опору виступаючих частин форми рухомому розплаву (рисунок 2.2).

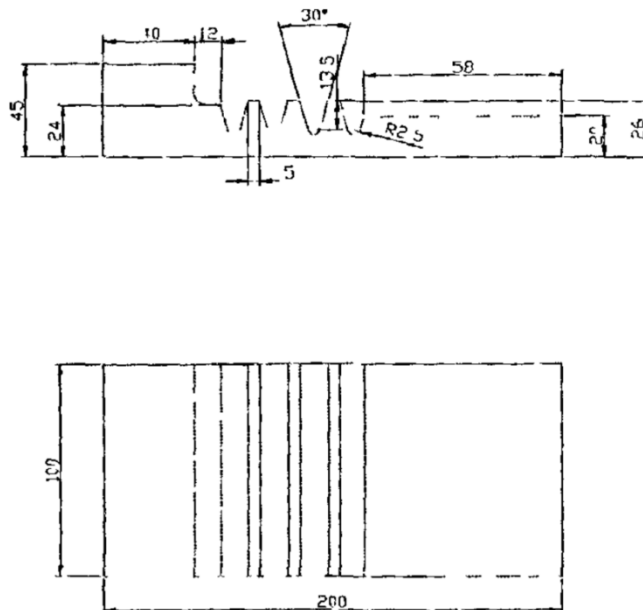
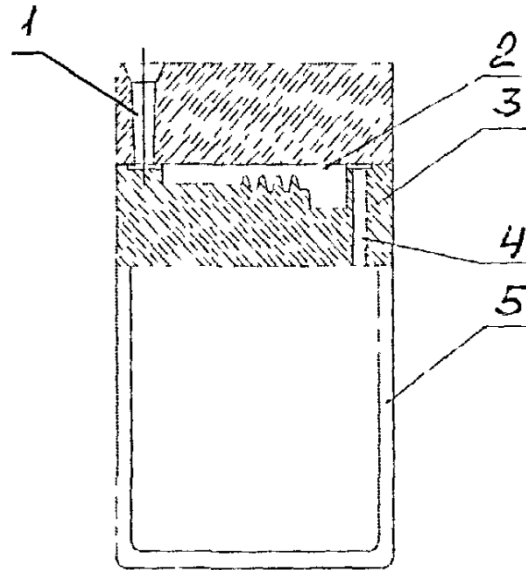


Рисунок 2.2 – Модель технологічної проби

Схема установки визначення ерозії (E_f) ливарних форм представлено рисунку 2.3.



1 – ливникова система, 2 - технологічна проба; 3-напівформа низу; 4 вертикальний зливний канал; 5 – графітова форма.

Рисунок 2.3 – Форма у зборі для оцінки ерозійної стійкості

При заливанні рідкий метал, протікаючи від ливникової системи 1 через пробу 2 до зливного каналу руйнує гострі ребра з досліджуваної суміші більшою чи меншою мірою в залежно від властивостей суміші, піщані включення потрапляють у графітову форму 5 і накопичуються у верхній площині виливки.

Висновки до другому розділу

1. Обґрунтовано вибір складів формувальних піщаних сумішей для дослідження.
2. Запропонована методика визначення фізико-механічних властивостей піщаних формувальних сумішей.
2. Розроблено методику оптимізації складу формувальної піщаної суміші.
3. Розроблено методику визначення ерозійної стійкості піщаної ливарної форми.
3. Розроблена технологічна проба зі ступінчастою пробою та складною зубчастою поверхнею, що дозволяє якісно оцінити ерозійну стійкість ливарних піщаних форм.

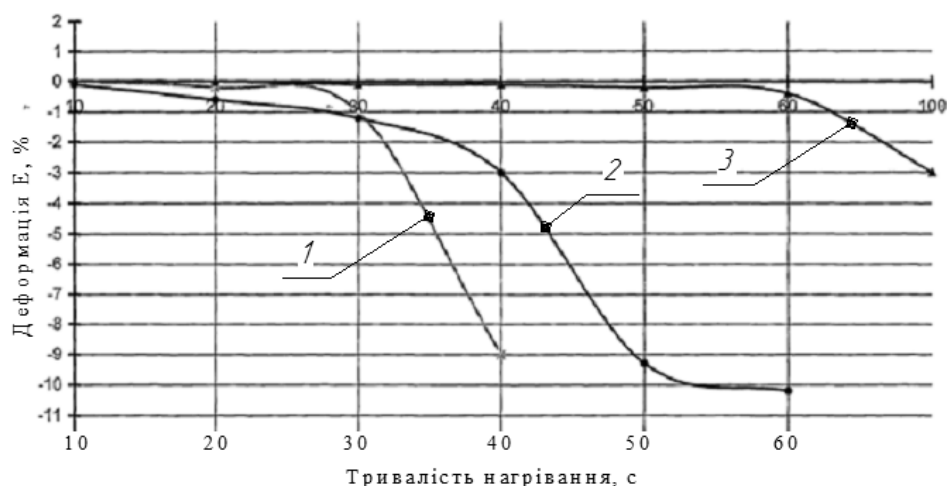
РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФОРМУВАЛЬНИХ ПІЩАНИХ СУМІШЕЙ ТА ЕРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ПІЩАНИХ ФОРМ

3.1 Формувальна піщана суміш з відходами керамічного виробництва

При розробці складу піщаної ерозійностійкої суміші за основу був прийнятий склад, згідно аналізу показав кращі результати в експериментах визначення деформативної здатності і ерозійної стійкості. Згідно з експериментальними дослідженнями найменшою деформативною здатністю і високою ерозійною стійкістю мають піщані суміші на основі рідкого скла.

Формувальні суміші, що містять в якості зв'язуючого рідке скло, твердіють при продуванні вуглекислим газом, внаслідок теплового сушіння, за рахунок випаровування вологи і при введенні в суміш ферохромового шлаку (рис. 3.1).



1 – РС з фер. хром. шлаком; 2 – РС теплова сушка; 3 – РС з продуванням CO_2

Рисунок 3.1 – Залежність деформації зразків з рідинноскляних сумішей під навантаженням від способу затвердіння

При тепловому сушінні ($T=220\ldots 260^\circ\text{C}$) або при продуванні вуглекислим газом (CO_2 - процес) затвердіння відбувається значно швидше, ніж при введенні

в суміш FeCr шлаку і міцність виготовлених форм досягає більше 3 МПа. Залежно від способу затвердіння ці суміші мають різний ступінь деформації.

На рисунку 3.1 представлені дослідження деформаційної здатності піщаних сумішей на осі рідкого скла під навантаженням 0,4 МПа при температурі 1270 К з різним способом затвердіння в залежності від часу витримки.

Деформаційні зміни у всіх зразках з рідинноскляних сумішей, незалежно від способу затвердіння, мають негативне значення, що свідчить про їхню податливість при високих температурах і як наслідок про високу ерозійну стійкість. Найбільшу ерозійну стійкість матиме форма, виготовлена з суміші, що затвердіває тепловою сушкою, так як вже через 10 с вона має найбільшу негативну деформацію в порівнянні з розглянутими сумішами. З часом деформація плавно зростає і форма рівномірно набирає міцність в умовах реального заливання форми розплавом. Суміші, що затвердівають за допомогою ферохромового шлаку та продуванням вуглекислим газом а перші 20 с. практично не деформуються. У цей час поверхневий шар ливарної форми досягає температури розплаву, під дією тепла на певній глибині сполучне розм'якшується, спікається і набуває високої міцності, але стає крихким. Тільки через 23 с у зразку з рідинноскляної суміші, що затвердіває за допомогою ферохромового шлаку, з'являється значна негативна деформація, отже, і ерозійна стійкість ливарної форми зростатиме. Крива негативної деформації зразка з рідинноскляної суміші з продуванням CO_2 має вид горизонтальної лінії протягом 50 с випробування і лише потім деформація зростає. Ливарна форма з цієї суміші буде мати меншу ерозійну стійкість.

Всі суміші на основі рідкого скла ерозійностійкі, проте в них для надання формуємості присутня глина, яка, як і наповнювач – кварцовий пісок при нагріванні розширюється та спікається. Навіть у формі з рідинноскляної суміші, затвердівшою тепловою сушкою, скоринка, що спеклася, схильна до утворення тріщин, які можуть перейти в ужиміни. Все це знижує поверхневу стійкість форми та є причиною ерозійного руйнування. Для виключення негативних

наслідків застосування у складі суміші глини, в магістерській роботі пропонується для рідинної скляної суміші, що затвердіває тепловою сушкою, замість глини використовувати відходи керамічного виробництва – шлікер. За зв'язуючими властивостями він поступається глині, але має наступні переваги:

- абсолютно інертний до розплаву у висушеному стані.
- містить у складі дрібнодисперсні частинки, що мають високу вогнетривкість.
- має низький коефіцієнт розширення температур.
- містить у складі плавкі речовини, що забезпечують збільшення міцності і піддатливості в нагрітому стані.
- дешевий та доступний, тому що є відходом виробництва керамічних виробів.

Дослідження проводили у три етапи.

На першому етапі досліджень була вивчена залежність властивостей міцності рідинноскляної суміші з шлікером (дослідної) у висушеному стані від вмісту шлікера при постійних значеннях температури сушіння – $T_{\text{сушіння}}$, часу сушіння – $\tau_{\text{сушіння}}$ і часу приготування суміші $T_{\text{пр}}$.

На другому етапі підбирали вміст зв'язуючого (рідкого скла) для надання їй необхідних властивостей. Суміш повинна мати технологічно необхідну живучість, формуємість, міцність у вологому стані тощо.

На третьому етапі досліджували спільний вплив шлікера та рідкого скла на деформаційну здатність зразків.

3.2 Дослідження фізико-механічних властивостей піщаних сумішей

Досліджувана рідкоскляна суміш зі шлікером – дослідна, на відміну від базової суміші, містить у своєму складі шлікер, який є термостійкою добавкою з вмістом глинистої складової (15,4%). Для надання суміші необхідної формуємості, міцності, осипаємості, газопроникності та інших технологічних властивостей необхідно визначитися із співвідношенням суміші шлікера і

зв'язуюного. З цією метою вивчали, як впливає шлікер на технологічні властивості суміші при постійному вмісті рідкого скла.

Таблиця 3.1 – Склад та властивості рідинноскляних сумішей з різним вмістом шлікеру, при вмісті сполучного 7%.

Найменування матеріалів	Зміст складових				
РС	7				
Кварцовий пісок	95	90	85	80	75
Шлікер	5	10	18	20	25
Фізико-механічні властивості					
Міцність на стиск у сирому стані, $\sigma_{ст}$ МПа	0,01	0,035	0,06	0,07	0,055
Міцність на розрив, σ_p Мпа	2,9	2,8	2,3	2,1	1,8
Осипуваність, %	0,01	0,05	0,13	0,14	0,18
Газопроникність, од.	200	180	151	145	145
Номер суміші	1	2	3	4	5

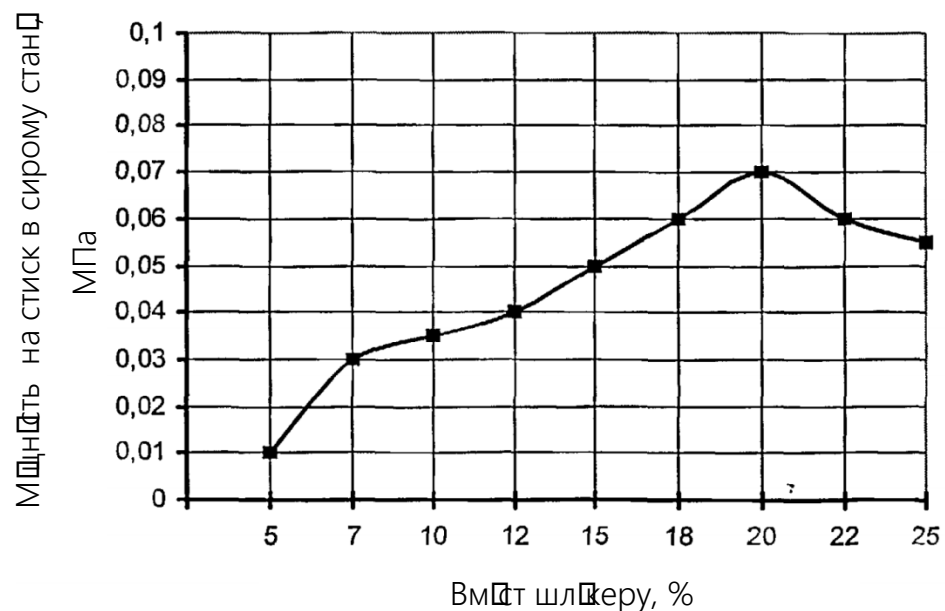


Рисунок 3.2 – Вплив вмісту шлікеру на міцність при стиску $\sigma_{ст}$, МПа в сирому стані, вміст рідкого скла 7 %

З рисунку 3.2 можна бачити, що при мінімальному вмісті у складі спеціальної суміші шлікера (5 %) та постійному вмісті рідкого скла 7 %, міцність суміші становить 0,01 МПа. Як показує практика, дана міцність є недостатньою для виготовлення зразків та їх транспортування. Подальше збільшення шлікера

призводить до зростання міцності суміші на стиск $\sigma_{ст}$. При вмісті в суміші 20% шлікера та 7% рідкого скла дослідна суміш набирає максимально можливу для цього складу міцність, яка становить 0,07 МПа. Дане можна пояснити, що все зв'язуюче, що входить до складу суміші, обволочує зерна наповнювача. Воно створює між ними манжети мінімальної товщини, в яких діють капілярні та міжатомні сили. Міцність суміші залежить від кількості контактів між зернами кварцового піску та шлікеру. З подальшим збільшенням у спеціальній суміші шлікера міцність $\sigma_{ст}$ падає. Що можна пояснити зниженням дії капілярних сил, так як збільшується необхідна площа змочування зв'язуючого. Достатні фізико-механічні властивості мають суміші № 3 та №4, але суміш № 4 має найкращі показники і тому її склад є оптимальним.

Залежність міцності дослідної суміші в сухому стані в залежності від вмісту шлікера у суміші при вмісті зв'язуючого 7% представлена на рисунку 3.3.

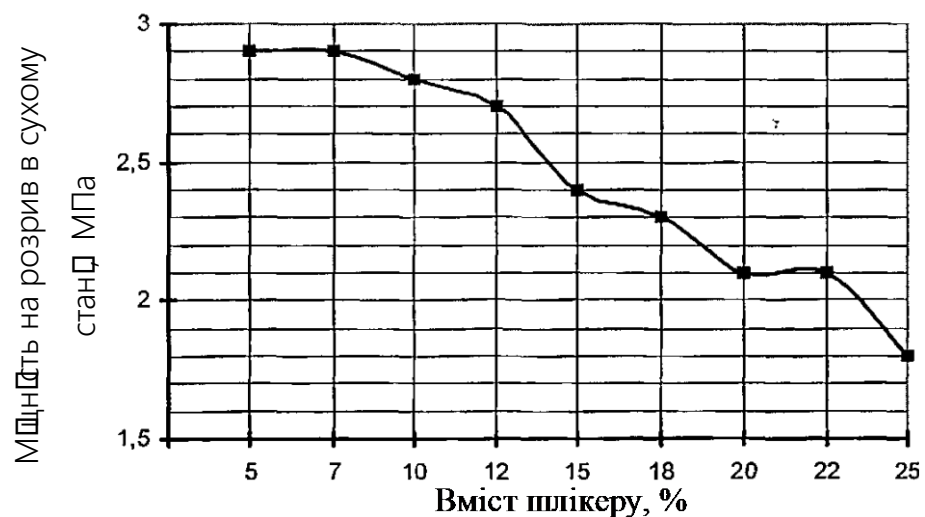


Рисунок 3.3 – Вплив вмісту шлікеру на міцність на розрив σ_p МПа в сухому стані, вміст рідкого скла 7 %

В даному випадку (рис. 3.3) міцність дослідної суміші в сухому стані залежить від якості зв'язуючого – рідкого скла. При надлишку зв'язуючого у складі суміші має максимальну міцність, але зі зменшенням товщини манжет між зернами наповнювача, міцність помітно падає і при вмісті шлікера в межах 22...25 % міцність суміші не відповідає технологічним вимогам. При вмісті шлікера 18...20% можна бачити горизонтальну лінію на графіку, яка свідчить про оптимальне співвідношення наповнювач- зв'язуюче.

Вплив шлікеру на осипуваність суміші представлено на рисунку 3.4.

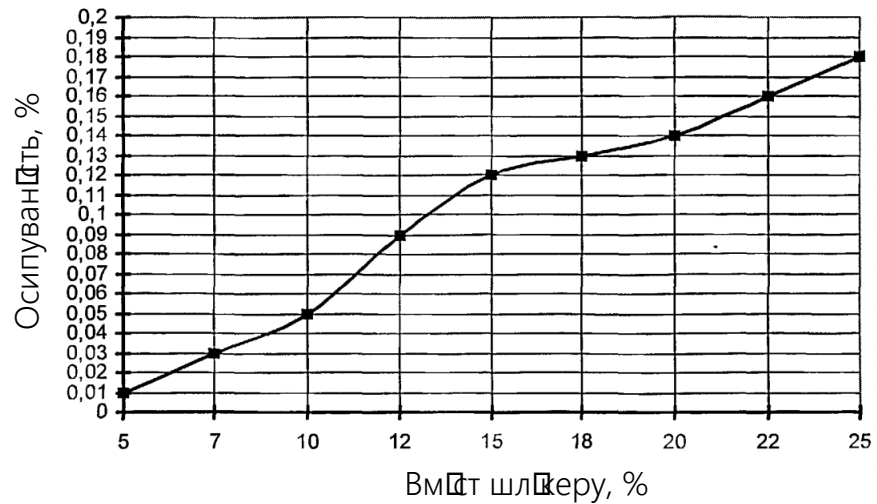


Рисунок 3.4 – Залежність впливу вмісту шлікеру на обсіпуваність суміші

З рисунку 3.4 можна бачити, що мінімальна осипуваність 0,01% відповідає максимальній міцності, і максимальна осипуваність 0,18% характеризується недоліком сполучного в суміші. У свою чергу при вмісті шлікера в межах 15...20% спостерігається зниження осипуваності, графік вирівнюється, що свідчить про вирівнювання характеристик міцності суміші в сухому стані.

Відомо, що газопроникність суміші залежить від її пористості та здатності пропускати через себе газ. Результати експериментальних досліджень впливу вмісту шлікеру на газопроникність досліджуваної суміші наведено на рис. 3.5.

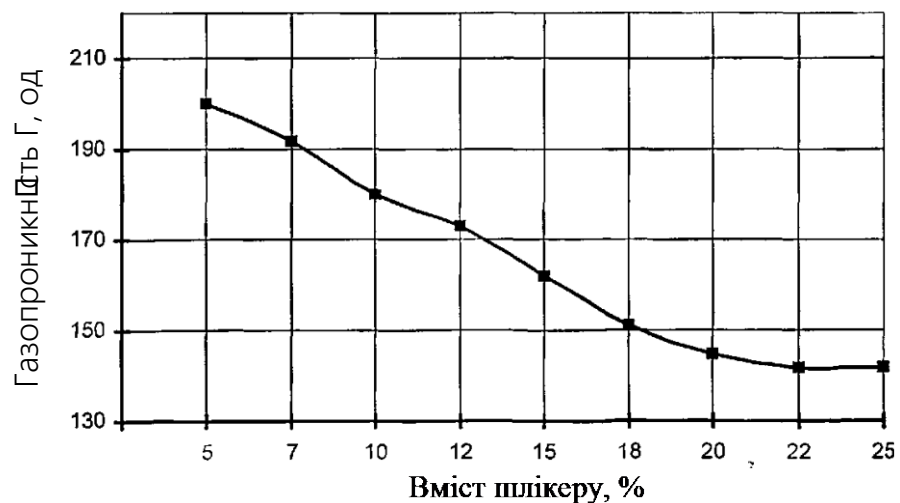


Рисунок 3.5 – Залежність впливу вмісту шлікеру на газопроникність піщаної суміші Г, од.

З рисунку 3.5 можна бачити, що суміш із вмістом шлікеру 5% і рідкого скла 7% має велику пористість, порівняно з сумішшю з 25% шлікеру та рідкого

скла 7%, так як для приготування суміші використовується дрібнодисперсна фракція шлікера з розміром $<0,1$ мм. Тому газопроникність суміші з підвищеним вмістом у складі шлікеру низька, але досить точна за технологічними особливостями використання суміші.

Таким чином, змінюючи вміст шлікеру в піщаній суміші в межах 5...25%, при постійному вмісті зв'язуючого 7%, суміш змінює свої фізико-механічні властивості, а саме: збільшується міцності у сирому стані, зменшується міцність на розтяг у сухому стані та знижується газопроникність. Для отримання суміші з більш високими фізико-механічними властивостями, які забезпечували б високу поверхневу міцність, необхідно в суміші збільшити вміст рідкого скла.

3.3 Дослідження фізико-механічних властивостей піщаної суміші залежно від вмісту зв'язуючого

Для підбору оптимального вмісту зв'язуючого – рідкого скла, за основу вибираємо склад піщаної суміші, який показав найкращі результати в проведених раніше дослідженнях. Базова суміш має наступний склад: кварцовий пісок – 80 %; шлікер – 20%. Склад та властивості піщаних сумішей, що розробляються та випробовувані, наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Склад та властивості рідинноскляних сумішей з різним вмістом зв'язуючого при вмісті шлікеру 20%

Найменування матеріалів	Вміст складових				
РС	7	9	11	13	15
Кварцовий пісок	80	80	80	80	80
Шлікер	20				
Фізико-механічні властивості					
Міцність на стиск у сирому стані, МПа	0,07	0,07	0,08	0,15	0,14
Міцність на розрив, МПа	2,1	2,4	2,9	3,8	3,9
Осипуваність, %	0,14	0,11	0,009	0,001	0,001
Газопроникність, од.	145	129	106	95	94
Номер піщаної суміші	1	3	5	7	9

Результати досліджень вплив вмісту рідкого скла на міцність при стиску в сирому стані піщаної суміші відображені на рисунку 3.6.

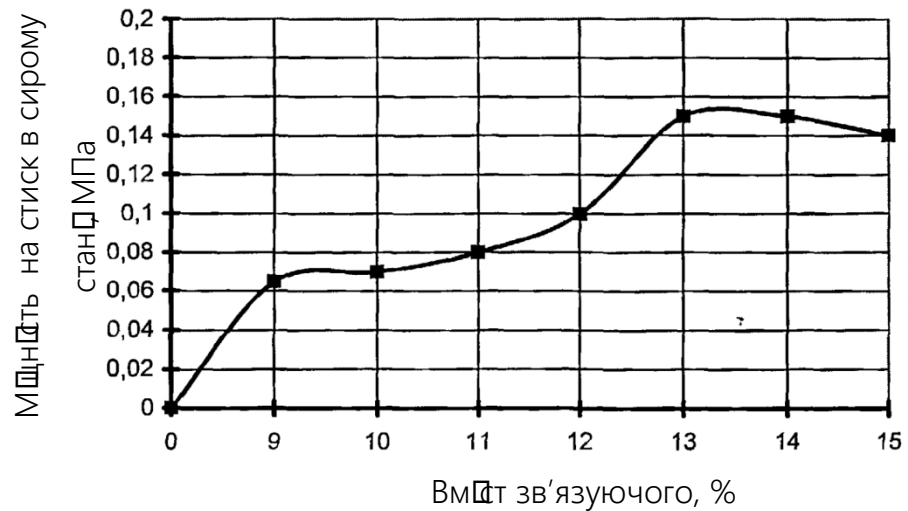


Рисунок 3.6 – Залежність вплив вмісту рідкого скла на міцність при стиску МПа в сирому стані дослідної піщаної суміш, вміст лікеру 20%

З рисунку 3.6 можна бачити, що для дослідної піщаної суміші із вмістом шлікеру 20 % та рідкого скла 7...9 % міцність на стиск $\sigma_{ст} = 0,07$ МПа, що є мінімальною маніпуляторною міцністю, необхідною для виготовлення зразка, форми та для її транспортування на подальші технологічні операції. При подальшому збільшенні в піщаній суміші зв'язуючого, міцність зростає та досягає максимуму 0,15 МПа при вмісті в суміші рідкого скла 13...14%. Дане можна пояснити аналогічними властивостями шлікеру властивостями глини, що починає проявляти свої зв'язувальні властивості тільки при досягненні певної вологості. Глиниста складова, що міститься в шлікері, взаємодіючи з рідкою фазою, набухає і більшою мірою виявляє свої в'язучі властивості. Вміст рідкого скла в дослідній піщаній суміші у кількості 13...14 % та шлікеру 20 % відповідає максимальній міцності на стиск у сирому стані. Подальше підвищення вмісту рідкого скла більше 15% збільшує міцність на розрив, але при цьому збільшується вологість піщаної суміші, її піддатливість, живучість, знижує міцність у сирому стані, що негативно впливає на якості виготовлення форм.

Міцність спеціальної суміші в сухому стані також залежить від кількості у складі зв'язуючого, яка витрачається на обволокування зерен наповнювача і

впливає на товщину манжет між зернами та від температури, часу сушіння, які в свою чергу залежить від розмірів форм (рисунок 3.7).

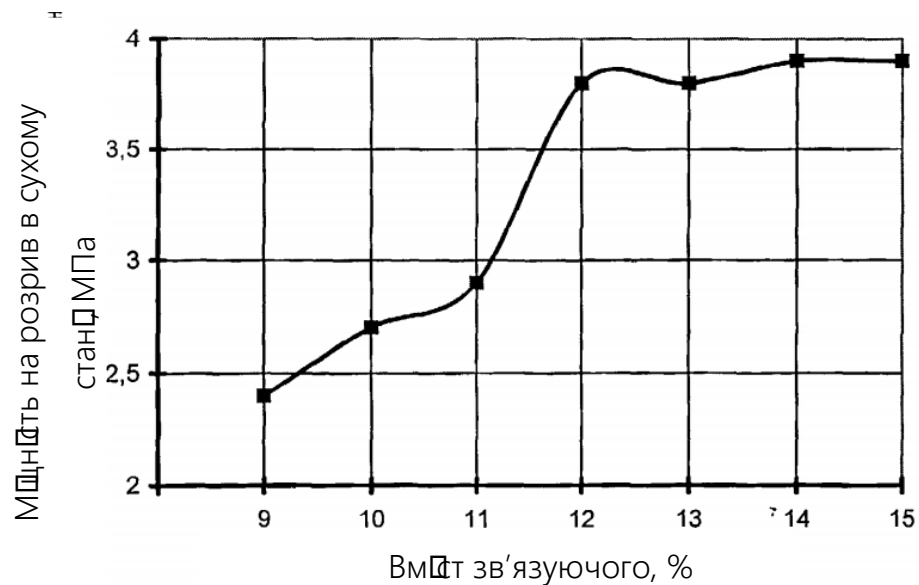


Рисунок 3.7 – Залежність впливу вмісту рідкого скла на міцність при розтягу σ_p , МПа в сухому стані піщаної суміші

З аналізу залежності впливу вмісту рідкого скла на міцність при розтягу в сухому стані піщаної суміші (рис. 3.7) видно, що при вмісті лікеру 20% в дослідній піщаній суміші, достатнім є 13% вмісту зв'язуючого. При подальшому збільшенні вмісту рідкого скла (РС) у складі піщаної суміші відбувається незначне збільшені міцності, що призводить тільки до перевитрати зв'язуючого.

Результати досліджень впливу вмісту рідкого скла на обсипуваність дослідної піщаної суміші наведено на рисунку 3.8.

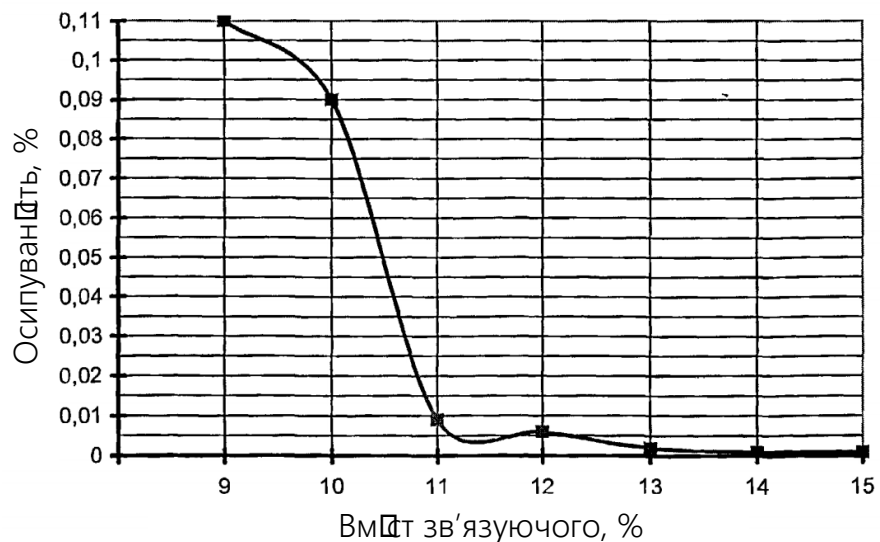


Рисунок 3.8 – Залежність впливу вмісту рідкого скла на обсипуваність дослідної піщаної суміші

З рисунку 3.8 можна бачити, що мінімальна обсіпуваність дослідної піщаної суміші при вмісті шлікеру 20% відповідає вмісту зв'язуючого 13...15%. При збільшенні в суміші зв'язуючого обсіпання наближається до нуля, що свідчить про максимальну поверхневу міцність при цьому співвідношенні інгредієнтів.

Результати досліджень впливу вмісту рідкого скла на газопроникність дослідної піщаної суміші показано на рисунку 3.9.

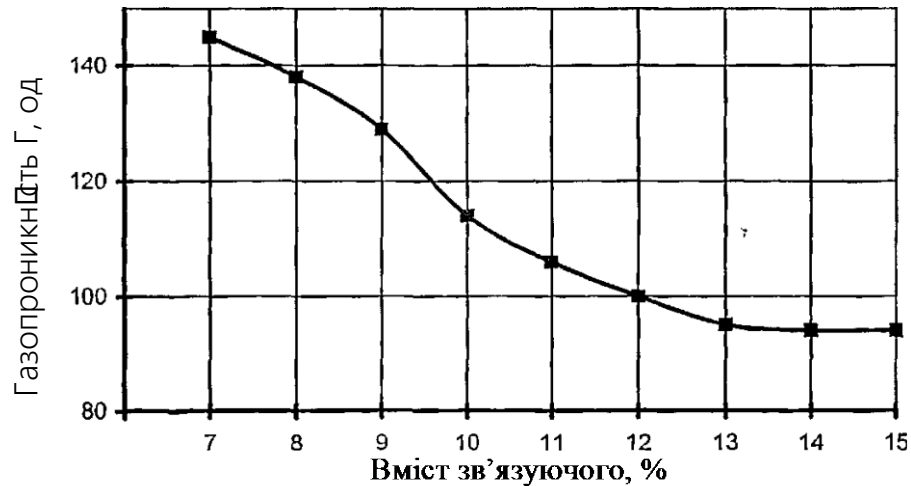


Рисунок 3.9 - Вплив вмісту рідкого скла на газопроникність дослідної піщаної суміші

Можна бачити, що газопроникність, згідно з рисунком 4.9, зменшується з 145 до 94 од. зі збільшенням у складі суміші рідкого скла з 9 до 15%. Дане можна пояснити збільшенням структурної щільності упаковки піщаної суміші.

Таким чином, на підставі проведених досліджень та отриманих результатів можна рекомендувати шлікер, як добавку для надання піщаної суміші ерозійної стійкості, а розроблену суміш вважати ерозійностійкою.

3.4 Дослідження впливу типу зв'язуючого на ерозійну стійкість ливарної форми

У виробничих умовах виливки відрізняються не лише за габаритами та конструктивно, а й за масою, тому дослідження ерозійної стійкості ливарних форм є необхідним технологічним заходом. Розроблена методика дає

можливість провести розширені дослідження ерозії форми залежно від часу заливки та маси металу, що протікає через неї з імітацією реального заповнення ливарної форми розплавом. Розроблена методика дозволяє визначати ерозійну стійкість ливарних форм, виготовлених із будь-яких сумішей, якісно та кількісно. У процесі дослідження можна змінювати склад досліджуваних сумішей, температуру розплаву, металостатичний натиск, швидкість, час заливки і т. д., а також масу металу, що проливається через пробу.

Дослідження ерозії ливарної форми (E_{ϕ}) можна проводити як візуально за якістю поверхні технологічної проби, тобто за площею руйнування, так і за площею засмічення та інших неметалевих включень у відсотках на поверхні технологічної проби, до загальної площі поверхні проби, а також за зміною маси технологічної проби після заливання, порівняно з масою технологічної проби, одержаної методом моделювання.

Підрахунок ерозії за площею засмічення та інших неметалевих включень у відсотках на поверхні технологічної проби проводити шляхом вимірювання площі зазорів на поверхні технологічної проби. Оцінку ерозії форми виконували у відсотках до загальної площі поверхні технологічної проби.

За зміною маси технологічної проби після заливання, ерозію ливарної форми можна підрахувати за різницею в масі проби-еталона (відлитої в кокіль або отриманої методом моделювання або теоретичного підрахунку за допомогою САПР) і проби отриманої в реальних умовах після очищення, обрубкування ливників визначення маси на електронних вагах.

Всі методики дозволяють досить точно оцінити ерозійну стійкість ливарної піщаної форми. Друга та третя методики кількісно визначають ступінь ерозійного руйнування та прийнятні як для одиничного, так і масового виробництва з різним рівнем науково-дослідної бази. До недоліків розробленого методу визначення ерозійної стійкості можна віднести час, що витрачається на приготування суміші, виготовлення форми, приготування розплаву, заливання його у форму, охолодження, очищення технологічної проби і вимірювання.

Інтерес розробленої методики є кількісною оцінкою ерозії ливарної піщаної форми, методом зважування отриманої в досліджуваній формі технологічної проби та її порівняння з пробою — еталоном. Різниця у вазі буде ступенем ерозії у грамах чи відсотках. Склад та властивості сумішей наведені у таблиці 2.1.

У процесі дослідження ерозійну стійкість визначали зміною маси технологічної проби після заливання, порівняно з масою технологічної проби у грамах та відсотках, проливаючи через технологічну пробу 30 кг сталі 25Л.

Після охолодження технологічних проб, виконували їх очищення та відокремлення від ливникової системи проводили зважування та підрахунок. В процесі експерименту, під час проливання через технологічну пробу розплав, розмивав порожнину технологічної проби руйнуючи зубчасту поверхню, піддаючи перегріванню та деформаційному руйнуванню інші поверхні. Місця руйнування заповнюються розплавом. При цьому маса проби буде більшою за масу еталона на величину ерозійного руйнування форми. Величину ерозії ливарної піщаної форми підраховували у % за формулою:

$$E_{\phi} = \frac{(G_{\text{проб}} - G_{\text{етал}})}{G_{\text{етал}}} \cdot 100\%$$

де $G_{\text{проб}}$ — маса технологічної проби;

$G_{\text{етал}}$ — маса проби еталону.

Результати досліджень величини ерозії ливарної піщаної форми наведені в таблиці 3.3.

З таблиці 3.3 видно, що при однаковій металоємності ливарної форми $G = 30$ кг найменшу ерозійну стійкість має форма з піщано-глинистої суміші $E_{\phi} = 0,47\%$. Ливарні форми на основі рідкого скла мають більшу ерозійну стійкість, що складає $0,024\%$, що підтверджує раніше проведені дослідження та зроблені висновки про їх стійкість до ерозії, яка залежить, більшою мірою, від типу сполучного та його термостійкості. Інтерес представляє розроблена рідинноскляна суміш із лікером, ерозія ливарної форми з неї становить $E_{\phi} = 0,012\%$

Таблиця 3.3 – Результати досліджень ерозії піщаних ливарних форм

№ випробуваної суміші	Маса проби - еталона, г	Маса дослідної проби, г	Різниця маси проб, г	Середня різниця маси проб, г	Ерозія форми (Еф), %
№1 ПГС	2387,3	2404,2	16,9	16,23	0,47
		2403,5	16,2		
		2402,9	15,6		
№2 Рідкоскляна з тепловим сушінням	2387,3	2388,2	0,9	0,93	0,024
		2388,3	0,8		
		2386,3	1,0		
Дослідна	2387,3	2387,8	0,5	0,46	0,012
		2387,5	0,2		
		2388	0,7		

Проведені дослідження з оцінки ерозії піщаних ливарних форм з різним зв'язуючим підтвердили, що форма з піщано глинистої суміші більш схильна до ерозійного руйнування ніж форми на зв'язуючому з рідкого скла. Крім того, дослідження дозволило кількісно визначити ступінь ерозії розглянутих піщаних форм при zalиванні 30 кг металу та порівняти їх. Виявлено, що розроблена піщана суміш має високу ерозійну стійкість.

Контрольна проба, залита у піщано-глиниту суміш (ПГС), представлена рисунку 3.10.

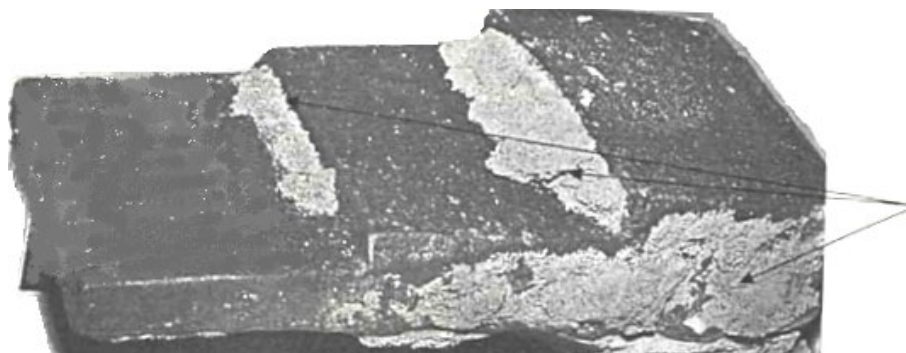


Рисунок 3.10 – Технологічна виливка-проба, отримана у формі з піщано-глинистої суміші

Дослідження показало, виливка (рис. 3.10) отримана у формі з піщано-глинистої суміші має яскраво виражені сліди руйнування та велику

кількість суміші, що спеклася на поверхні. Під дією високої температури і пари, що виділяється, дрібнодисперсні частинки суміші спікаються, утворюючи міцну кірку на поверхні виливки.

Виливок, отриманий у формі з використанням рідко скла з тепловим сушінням, представлена на рисунку 3.11.

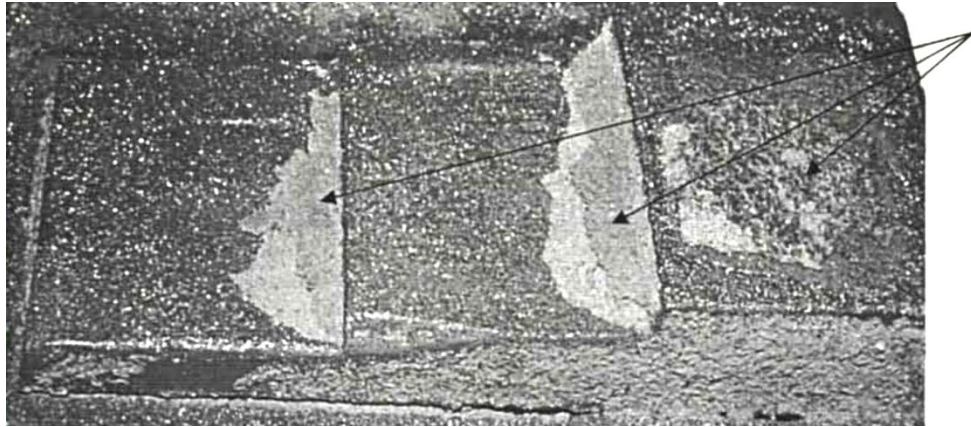


Рисунок 3.11 – Технологічна виливка-проба, отримана у формі з рідко скла з тепловим сушінням

Поверхня виливки (рис. 3.11) має незначні пошкодження форми після вилучення проби з нижньої напівформи, що свідчать про достатньої термостійкості форми та відсутності пригару та слідів ерозії.

Форма та виливок технологічної проби, отриманої з застосуванням дослідної рідинноскляної суміші з шлікером з тепловим сушінням представлена на рисунку 3.12.

Аналіз проведених досліджень показує, що дослідна суміш добре відтворює відбиток моделі (рисунок 3.12), не дає пригару навіть у кутах переходу товщина стінок. Виливка практично не вимагає очищення після вибивання. Відсутність засмічень на поверхні проби та стан форми після її вилучення показує, що форма добре протистоїть руйнівній дії розплаву при заливці та охолодженні металу.

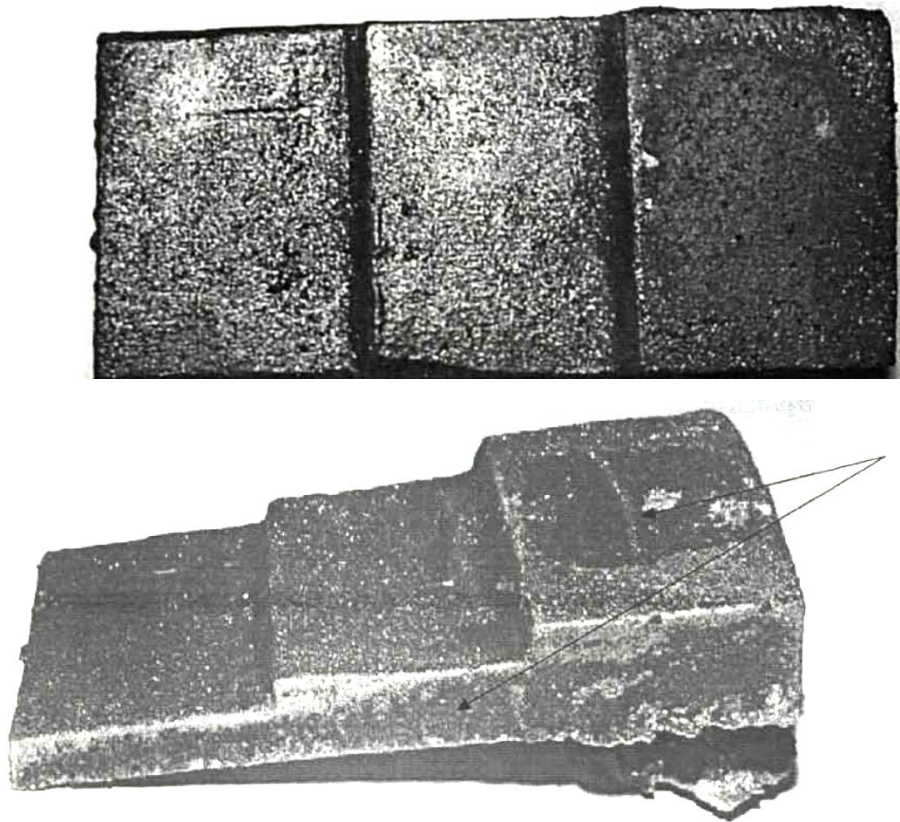


Рисунок 3.12 – Виливок технологічної проби, отриманий у формі дослідної суміші

Однак ступінчаста проба не завжди відображає конфігурацію реальної виливки і тому не дає повної картини ерозійного руйнування форми. Для цього була розроблена спеціальна проба та методика, що дозволяє досліджувати ерозійну стійкість ливарної форми в залежності від металостатичного тиску, швидкості, тривалості заливки, маси і температури металу, що заливається.

Для оцінки ерозійної стійкості піщаної ливарної форми, виготовленої з дослідної формувальної суміші, по технологічній зубчастій пробі представлені на рис. 3.13.

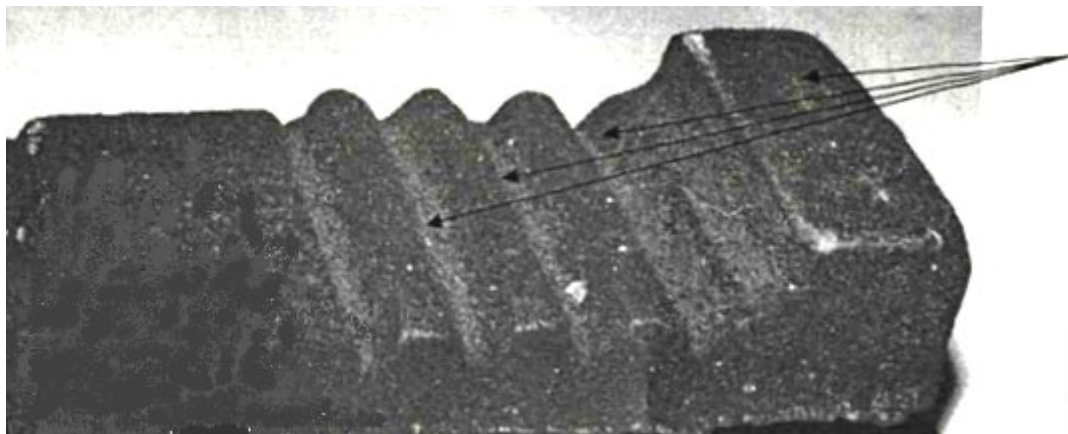


Рисунок 3.13 – Вилив зубчастої проби, отриманий у формі виготовленої з дослідної формувальної суміші

Зовнішній вигляд виливки (рис. 3.13) технологічної проби, отриманої у формі виготовленої з дослідної формувальної суміші, показав відсутність засмічень у місці підведення металу, не зруйновані зуби свідчать про ерозійну стійкість даної форми, що вказує високу терmostійкість та підтверджує негативну деформацію.

Висновки до третього розділу

1. Показано, що змінюючи вміст шлікеру в піщаній суміші в межах 5...25%, при постійному вмісті зв'язуючого рідкого скла 7%, суміш змінює свої фізико-механічні властивості, а саме: збільшується міцності у сирому стані, зменшується міцність на розтяг у сухому стані та знижується газопроникність, що дає можливість рекомендувати шлікер, як добавку для надання піщаної суміші ерозійної стійкості, а розроблену суміш вважати ерозійностійкою.

2. Проведені дослідження з оцінки ерозії піщаних ливарних форм з різним зв'язуючим підтвердили, що форма з піщано глинистої суміші більш схильна до ерозійного руйнування ніж форми на зв'язуючому з рідкого скла. Виявлено, що розроблена піщана суміш має найвищу ерозійну стійкість.

3. Підібрані оптимальні склади ерозійностійкої суміш з добавкою шлікеру, що складається з кварцового пісок – 80%, шлікер – 20%, рідкого скла – 13%.

Розроблена суміш має міцність у сирому стані 0,15 МПа, в сухому стані 3,0 МПа, низьку осипуваність = 0,001% та негативну деформацію 0,5% через 20 с.

4. Експериментально встановлено, що розроблена суміш має найбільшу ерозійну стійкість, ерозія якої становить $E_f = 0,012\%$ в порівнянні з ерозією форм, що виготовлені з ПГС та рідко скляної.

5. Результати досліджень дозволили пояснити причини ерозії ливарної форми з піщаних сумішей та розробити комплекс заходів, спрямованих на підвищення ерозійної стійкості ливарної форми при отриманні виливків.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Встановлено, що основною причиною ерозійного руйнування ливарної піщаної форми, є низька якість вихідних формувальних матеріалів, що використовуються для приготування формувальних і стрижневих сумішей, а також низька якість виготовлення форм. Існуючі методи оцінки ерозійного руйнування піщаних ливарних форм технічно складні для реалізації та малочутливі. Розробка простих, універсальних та достовірних методів визначення ерозії форми має велике практичне значення.

Запропонована методика визначення фізико-механічних властивостей піщаних формувальних сумішей. Розроблено методику оптимізації складу формувальної піщаної суміші та ступінчаста технологічна проба з складною зубчастою поверхнею, що дозволяє якісно оцінити ерозійну стійкість ливарних піщаних форм.

Показано, що змінюючи вміст шлікеру в піщаній суміші в межах 5...25%, при постійному вмісті зв'язуючого рідкого скла 7%, суміш змінює свої фізико-механічні властивості, а саме: збільшується міцності у сирому стані, зменшується міцність на розтяг у сухому стані та знижується газопроникність, що дає можливість рекомендувати шлікер, як добавку для надання піщаної суміші ерозійної стійкості, а розроблену суміш вважати ерозійностійкою.

Підібрані оптимальні склади ерозійностійкої суміш з добавкою шлікеру, що складається з кварцового пісок – 80%, шлікер – 20%, рідкого скла – 13%. Розроблена суміш має міцність у сирому стані 0,15 МПа, в сухому стані 3,0 МПа, низьку осипуваність = 0,001% та негативну деформацію 0,5% через 20 с.

Експериментально встановлено, що розроблена суміш має найбільшу ерозійну стійкість, ерозія якої становить $E_{\phi} = 0,012\%$ в порівнянні з ерозією форм, що виготовлені з ПГС та рідко скляної.

На підставі комплексних теоретичних та експериментальних досліджень встановлено взаємозв'язок властивостями формувальних сумішей та утворенням поверхневих дефектів та ерозійною стійкістю. Визначено оптимальні параметри цих властивостей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 2541 – 94. Виробництво ливарне. Терміни та визначення.
2. Дорошенко С.П. Формувальні суміші. – К.: ІЗМН, 1997. – 140 с.
3. Дорошенко С.П. Взаємодія піщаної форми з виливком: Навчальний посібник. – К.: УМК ВО, 1991. – 76 с.
4. Цибрик А.Н. Физико-химические процессы в контактной зоне металл-форма. – Киев: Наукова думка, 1977. – 211с.
5. Петриченко А.М. Книга о литье. – Київ: Техніка. 1972. – 277с.
6. Гнатуш В. А. Мировой рынок литья – повышательный тренд / В. А. Гнатуш // Нові матеріали та технології в машинобудуванні: матеріали Міжнародної наук.-техн. конференції / КПІ ім. І. Сікорського. – Київ: 2016. – С. 35 – 38.
7. Дорошенко С. П. Взаємодія піщаної форми з виливком / С. П. Дорошенко. – Київ: НМК ВО, 1991. – 76 с.
8. Формовочные материалы и смеси / [С. П. Дорошенко, В. П. Авдокушин, К. Русин, И. Мацашек]; Київ: Вища школа, 1980. – 416 с.
9. Круглицкий Н. Н. Физико-химические основы регулирования свойств дисперсных глинистых минералов / Н. Н. Круглицкий. – Київ: Наукова думка, 1968. – 320 с.
10. Пащенко А. А. Вяжущие материалы. – 2-е изд. / А. А. Пащенко, В. П. Сербин, Е. А. Старчевская. – Київ: Вища школа, 1985. – 440 с.
11. Власов А. Т. Связующие для изготовления песчано-смоляных форм и стержней по ХТС-процессу / А. Т. Власов, С. С. Поляков // Литьё Украины. – 2007. – № 11. – С. 10 – 25.
12. Тищенко А. Связующие для холоднотвердеющих смесей / А. Тищенко, И. Юрков // Литьё Украины. – 2009. – № 6. – С. 33 – 37.
13. Кузнецов П.Б. Связующие для фуран-процесса (кислотное отверждение) / П. Б. Кузнецов // Литьё Украины. – 2009. – № 7. – С. 28 – 34.

14. Руководство по выбору формовочных и стержневых смесей и противопригарных красок для стального и чугунного литья / С. П. Дорошенко, В. Н. Дробязко. – Київ: 1976. – 62 с.
15. Рыжиков А.А. Технологические основы литейного производства / А.А. Рыжиков - М.: Машгиз, 1962 г.
16. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов / Б.Б. Гуляев - Л.: Машиностроение, 1976 г.
17. Гуляев Б.Б. Формовочные процессы / Б.Б. Гуляев, О.А. Корнышкин, А.В. Кузин - Л.: Машиностроение, 1987 г.
18. Петриченко А.М. Термостойкость литейных форм / А.М. Петриченко, А.А. Померанец, В.В. Парфенова - М., Машиностроение, 1982 г.
19. Жуковский С.С. Прочность литейной формы / С.С. Жуковский - М.: Машиностроение, 1989. - С.228.
20. Медведев Я.И. Газовые процессы в литейной форме / Медведев Я.М. М.: Машиностроение, 1980, 200 с.
21. Хомицкий А.А. Об оценке пористости отливок / Инженер А.А. Хомицкий // Литейное производство. - 1988. - №7. – с. 11 - 12.
22. Мурашов Н.И. Песочные раковины в крупных стальных отливках / Н.И. Мурашов, Б.А. Рыбальченко, В.А. Денисов, В.А. Сторожук // Литейное производство. - 1983. - №11, - с. 25 - 26.
23. Медведев Я.И. Технологические испытания формовочных материалов / Я.И. Медведев., И.В. Валисовский // М., Машиностроение - 1973.- с. - 282- 298.
24. Берг П.П. Использование радиоактивных изотопов для изучения механизма образования засоров в отливках / П.П. Берг, М.А. Студниц, Б.Ю. Фейгельсон // Литейное производство. – 1956.- №7
25. Гуляев, Б.Б. Исследование засоров в отливках при помощи радиоактивных изотопов / Б.Б. Гуляев, Ю.Ф. Боровский, З.В. Сигалова, Е.С. Соколова // Литейное производство. — 1956.- №8.
26. Гуляев, Б.Б. Теория литейных процессов / Б.Б. Гуляев- Л.: Машиностроение, 1976. - 216с

27. Ветишка А. / Под ред. К.И. Ващенко — Теоретические основы литейной технологии (пер. с чеш.). — Киев: Вища школа, 1981. — 318с.
28. Могилев В. К., Лев О. И. Справочник литейщика. — М.: Машиностроение, 1988. — 271 с.
29. Москалев І. Н. Ливарні сплави та їх плавка: Навчальний посібник. — К.: НМКВО, 1993. — 368с.
30. Сабірзянов Т.Г.Теплотехніка ливарних процесів / Т.Г. Сабірзянов, В.М. Кропівний. — Кіровоград: КНТУ, 2005. — 402 с.