

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

СОЛОНЕНКО ЛЮДМИЛА ІГОРІВНА

УДК 621.742.4

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИГОТОВЛЕННЯ
ВИЛИВКІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНІ
НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ КВАРЦОВІ ФОРМИ**

Спеціальність 05.16.04 – Ливарне виробництво

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Одеса

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Лисенко Тетяна Володимирівна,
завідувач кафедри технології та управління
ливарними процесами Одеського національного
політехнічного університету, м. Одеса.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Реп'ях Сергій Іванович,
начальник науково-дослідної частини Національної
металургійної академії України, м. Дніпро;

доктор технічних наук, професор
Наумик Валерій Владиленович,
проректор з наукової роботи та міжнародної
діяльності Запорізького національного технічного
університету, м. Запоріжжя.

Захист відбудеться «_____» _____ 2018 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.02 в Національній металургійній академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий «_____» _____ 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.02,
д. т. н., проф.

Т.М. Миронова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогодні для виготовлення виливків з алюмінієвих сплавів в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва лиття в Україні переважно використовують форми та стрижні, які виготовлені з піщано-глинистих (ПГС) або холодно-твердіючих (ХТС) сумішей. При цьому, при використанні ПГС у зв'язку з відносно невеликою міцністю форм та стрижнів виникають проблеми з їх якістю, точністю розмірів та чистотою поверхні виливків і т.д. При використанні ХТС, у зв'язку з відносно невеликою твердістю алюмінієвих сплавів та надмірною міцністю ХТС, виникають проблеми вибивання виливків та стрижнів, а при використанні у складі ХТС сполучних речовин органічного походження – погіршення санітарних умов виготовлення виливків, проблеми утилізації використаної суміші та ін.

Лиття в низькотемпературні форми (НТФ) – один із перспективних напрямків виготовлення литих деталей, що дозволяє значно економити формувальні матеріали, скоротити трудомісткість операцій вибивки форм і стрижнів, знизити шкідливі викиди у ливарному цеху, покращити якість поверхні та точність розмірів виливків, знизити собівартість їх виготовлення, не потребує використання обладнання та матеріалів іноземного походження.

В даний час НТФ використовують закордонні фірми для виробництва дрібних і середніх за масою фасонних виливків, переважно з легкоплавких кольорових сплавів. Зокрема, в Англії для виробництва виливків зі сталі, ковкого чавуну, мідних і алюмінієвих сплавів використовують Ефсет-процес за яким суміш з кварцового піску, води та мастила заморожують рідкою вуглекислою з температурою -78°C . Тим не менш, в наявний час, не зважаючи на високий рівень розвитку та виробництва холодильної техніки, спосіб лиття в НТФ в Україні ще не використовують.

Питанню використання НТФ присвячені роботи багатьох вчених та дослідників, зокрема, А.А. Луньова, В.М. Грузмана, М.І. Замятіна, О.І. Шинського та ін. Проте на сьогодні дані про особливості виготовлення та використання НТФ з матеріалів українського походження, їх склад та властивості, вплив НТФ на якість та структуру виливків, технологічні основи та умови використання НТФ для виготовлення виливків, у тому числі з алюмінієвих сплавів, відсутні або мають фрагментарний характер.

Тому робота, що спрямована на розробку наукових і технологічних основ виготовлення НТФ для лиття виливків з алюмінієвих сплавів, зниження собівартості одержуваного литва шляхом багаторазового використання кварцового піску, а в якості сполучного – воду та глину, скорочення трудомісткості операцій формоутворення, вибивки форм і стрижнів, поліпшення санітарних умов праці на виробництві, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язано з тематичними планами Одеського національного політехнічного університету, Фізико-технологічного інституту металів і сплавів НАН України та виконанням держбюджетної науково-

дослідної роботи (тема: №86-28 «Підвищення якості виливків із залізобуглецевих та кольорових сплавів за рахунок керування ливарними процесами» (№ДР 0114U000637); тема: III-19-15-662 «Розробка наукових та технологічних засад щодо створення литих конструкцій з залізобуглецевих й кольорових сплавів, оптимальних процесів їх одержання і автоматизованих методів проектування», частина I (№ДР 0115U000693); тема: III-19-15-662 «Розробка наукових та технологічних засад щодо створення литих конструкцій з залізобуглецевих й кольорових сплавів, оптимальних процесів їх одержання і автоматизованих методів проектування», частина II (№ДР 0115U000693).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є визначення закономірностей і результату формування НТФ і їх вплив на якість і мікроструктуру виливків загальномашинобудівного призначення з алюмінієвих сплавів.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

1) встановити закономірності впливу компонентів низькотемпературної суміші (НТС), виготовленої на основі піску Вільногірського родовища, їх природи, особливостей підготовки до використання, умов виготовлення і параметрів технології на властивості НТФ;

2) дослідити кінетику руйнування НТФ при кімнатній температурі в умовах динамічного впливу на неї;

3) встановити закономірності впливу параметрів виготовлення НТФ на ливарні властивості і мікроструктуру алюмінієвого сплаву АК5М2;

4) встановити закономірності в співвідношеннях розмірів елементів ливникової системи, спрямованих на попередження руйнування НТФ при її заливанні;

5) оптимізувати склад НТС і встановити закономірності впливу його компонентів на властивості форми;

6) випробувати в промислових умовах результати досліджень;

7) впровадити наукові і технологічні розробки в навчальний процес.

Об'єкт дослідження. Процес виготовлення НТФ для литва алюмінієвих сплавів.

Предмет дослідження. Закономірності впливу параметрів виготовлення НТФ на її властивості, ливарні властивості та мікроструктуру сплаву АК5М2 у литому стані.

Методи дослідження. В роботі були використані загальноприйняті та стандартні методи, методики і апаратура, оригінальні методики, які дозволили встановити об'єктивний взаємозв'язок між досліджуваними параметрами: метод визначення міцності на стиск, розтяг і вигин формувальної суміші (ГОСТ 23409.7-78); метод для визначення плинності формувальної суміші (ГОСТ 23409.17-78); метод визначення вологості формувальної суміші (ГОСТ 23409.5-78); метод визначення щільності формувальної суміші (ГОСТ 23409.13-78); метод для визначення газопроникності формувальної суміші (ГОСТ 23409.6-78); метод визначення рідиноплинності алюмінієвого сплаву (ГОСТ 16438-70); метод визначення шорсткості поверхні (ГОСТ 25142-82); метод статистичної

обробки експериментальних даних; метод дослідження вільної та утрудненої лінійної усадки виливків; метод дослідження передусадкового розширення виливків; метод дослідження мікроструктури сплаву АК5М2. В роботі також використана оригінальна методика для дослідження кінетики руйнування НТС на повітрі при безперервному динамічному впливу на них.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. *Вперше встановлено закономірності кінетики руйнування НТФ попередньо охолоджених до -15°C при температурі навколишнього повітря $+20\pm 1^{\circ}\text{C}$ і безперервному динамічному впливу на них.*

Раніше такі закономірності для формувальних та стрижневих сумішей не були відомими. Отримані результати дозволили створити опис механізму цього явища, провести об'єктивну оцінку впливу умов формування НТФ на її технологічність, розширити уявлення про можливості та придатність використання НТФ для виготовлення виливків загальномашинобудівного призначення.

2. *Вперше встановлено закономірності комплексного впливу компонентів НТС, виготовленої на основі кварцового піску та глини, відповідно, Вільногірського, Присяновського та Дашуковського родовищ (Україна), їх природи, особливостей підготовки до використання і умов виготовлення НТФ на їх властивості.*

Раніше такі дані відомими не були. Це дозволило визначити придатні матеріали і умови виготовлення НТФ на основі кварцового піску Вільногірського родовища, оптимізувати склад НТС і умов виробництва з них ливарних форм, які забезпечують виготовлення виливків з алюмінієвих сплавів підвищеної якості.

3. *Вперше для виливків з алюмінієвих сплавів встановлені закономірності впливу співвідношень розмірів елементів ливникової систем, параметрів вилівка і умов заливки на максимально-припустиму масу розплаву, що пройшла через один погонний сантиметр ширини живильника у межах $0,025 \dots 0,174 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{см})$ та на руйнування НТФ при її заливанні.*

Раніше такі закономірності для виливків з алюмінієвих сплавів при литті в НТФ не були відомими. Це дозволило розробити вимоги до ливникових систем та умов заливання алюмінієвих сплавів з метою попередження виникнення у виливках засмічень.

4. *Вперше для сплаву АК5М2 встановлені закономірності впливу НТС, виготовленої на основі піску Вільногірського та глини Дашуковського родовища (Україна), на його ливарні властивості та якість виливків.*

Раніше такі закономірності для виливків з алюмінієвих сплавів при литті в НТФ, що виготовлені на основі піску Вільногірського та глини Дашуковського родовища (Україна), не були відомими. Це дозволило розширити уявлення щодо конструювання ливникових систем для виливків зі сплавів на основі алюмінію при литті в НТФ і дало можливість підвищити якість лиття.

5. *Вперше встановлено та на рівні гіпотези пояснене явище впливу виду підготовки води, що входить у рецептуру НТС, виготовленої на основі*

кварцового піску і глини, на величину її міцності.

Раніше таке явище відомо не було. Розробка дозволяє цілеспрямоване використання способу підготування води в рецептурі замороженої формувальної суміші, що містить глину, для корегування її міцності в залежності від конфігурації та маси вилівка, особливостей технології підготування форми до заливки.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами виконаних досліджень та оптимізації розроблено суміш для НТФ, яка складається з кварцового піску марки 1К₃О₃016 Вільногірського родовища (Україна), 5±0,2 % водопровідної води та 5±0,2 % бентонітової глини марки С2Т₂ та при температурі не вище -19...-20 °С, що відповідає вимогам до формувальних сумішей і має наступний рівень властивостей: $\sigma_{СТ} = 1,0...1,1$ МПа; газопроникність – 90...95 од; обсипальність не більше 0,2 %; плинність при +20 °С – 57...60 %. При цьому, зі збільшенням вмісту в суміші води і глини міцність суміші підвищується, а обсипальність і газопроникність знижуються.

Розроблені аналітичні залежності та симплекс-номограма, використання яких дозволяє розрахувати розміри живильників ливникової системи для виливків з алюмінієвих сплавів при литті в НТФ. Це, в порівнянні з виливками, що виготовляють в ПГФ, дозволило підвищити точність розмірів виливків в 2,5...3,0 рази та скоротити дефектність лиття по засміченню більш ніж у 8 разів.

Результати роботи пройшли дослідно-промислово перевірку в ДП «ІЦЛПТ» м. Одеса за якою встановлено, що використання розробленої суміші для НТФ та ливникової системи дозволило збільшити розмірну точність виливка-представника «Кришка» зі сплаву АК5М2 на 60...75 % в порівнянні з аналогічним виливками залитими в ПГФ (акт від 20.12.2017 р.). Результати досліджень, запропоновані методики та моделі, впроваджені в навчальний процес Одеського національного політехнічного університету при вивченні дисциплін «Теоретичні основи ливарного виробництва», «Моделювання та оптимізація технологічних систем», «САПР ливарних технологій», а також у курсовому та дипломному проектуванні (довідка від 02.02.2018 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати, отримані в дисертації, базуються на дослідженнях, проведених особисто здобувачем. Публікації відображають результати досліджень, виконаних здобувачем. У дисертації не використані ідеї співробітників, які сприяли виконанню роботи. Здобувач безпосередньо розробив технологічні та теоретичні основи виготовлення НТФ, провів експерименти, аналіз та обробку отриманих даних. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві (в порядку, наведеному у списку публікацій здобувача):

– аналіз сучасного стану виробництва виливків з використанням кріотехнологій, механічних і технологічних властивостей НТФ, процесів теплової взаємодії НТФ з рідким металом і виливком, затвердіння і охолодження виливків в НТФ, науково-обґрунтований вибір і розрахунок основних параметрів обладнання для заморожування формувальних сумішей [1, 13, 14];

– досліджено вплив вібрації на фізичні та технологічні властивості НТФ [2];

- розраховано параметри заморожування ливарних форм і стрижнів та розроблена схема відповідного низькотемпературного комплексу [3, 10];
- досліджені особливості та розроблена технологія лиття композиційних вставок для виливків з алюмінієвих сплавів [4, 11];
- досліджено вплив складу та температури охолодження формувальної суміші на міцність НТФ [5, 12];
- аналіз аспектів технології виготовлення виливків з використанням моделей, що газифікуються [6, 8, 9];
- комп'ютерне моделювання та аналіз процесу затвердіння виливків в НТФ [7];
- аналіз процесів, що супроводжують охолодження виливків [15].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи були представлені та обговорені на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях: VIII Міжнародній науково-технологічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (Київ, 2016 р.); XII Міжнародній науково-практичній конференції «Литво 2016», V Міжнародній науково-практичній конференції «Металургія 2016» (Запоріжжя, 2016 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» (Краматорськ, 2017 р.); XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Литво 2018», VII Міжнародній науково-практичній конференції «Металургія 2018» (Запоріжжя, 2018 р.); на науковому семінарі кафедри технології та управління ливарними процесами ОНПУ (м. Одеса, 2018 р.) та на науковому семінарі кафедри ливарного виробництва НМетАУ (м. Дніпро, 2018 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи викладені у 15 друкованих працях, в тому числі: у 1 монографії, у 6 фахових виданнях, з яких 1 входить до міжнародних наукометричних баз, у 7 тезах доповідей на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях, у 1 навчальному посібнику.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, основної частини – чотирьох розділів з висновками до кожного з них, загальних висновків, списку використаних джерел з 114 найменувань і 3 додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 144 сторінках загального машинописного тексту, містить 44 рисунки і 22 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано її мету та задачі досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення, а також відомості щодо апробації отриманих результатів.

У першому розділі проаналізовано склад та властивості сучасних формувальних та стрижневих сумішей, що використовують при виробництві виливків з легких кольорових сплавів. Визначені основні вимоги до

формувальних і стрижневих матеріалів та сумішей, розглянуті сучасні способи виготовлення НТФ і стрижнів, проаналізовані результати досліджень вітчизняних та іноземних дослідників, вітчизняний та зарубіжний досвід виготовлення НТФ та найбільш відомих технологій виготовлення НТФ і стрижнів.

На підставі літературних даних і проведеного аналізу сучасного стану питання сформульовано мету та завдання досліджень, які необхідно вирішити для її досягнення.

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

Для виміру температур використовували безконтактний інфрачервоний термометр-пірометр мод. AR360A, а також спиртовий термометр мод. ТТЖ-М. Для зважування компонентів формувальної суміші і зразків використовували ваги лабораторні мод. SF-400-D-3 (0,1...3,0 кг). Розмірні вимірювання проводили з використанням штангенциркуля мод. MIOL 15-220 з похибкою 0,1 мм.

Для визначення міцності на стиск НТС застосовували універсальний прилад мод. 04416. Для визначення плинності формувальної суміші використовували твердомір мод. 04412A.

Газопроникність НТС визначали на приладі мод. 04315. Обсипальність НТС визначали на приладі мод. 056. Визначення параметрів шорсткості поверхні зразків зі сплаву АК5М2 проводили на оптичному профілометрі мод. WYKO NT1100. Температуру розплаву вимірювали хромель-алюмелевою (ХА) термопарою у комплекті з потенціометром КСП-4. Мікроструктуру зразків досліджували на мікроскопі Neophot-32.

Дослідження кінетики руйнування зразків з НТС на повітрі при безперервному динамічному впливі на них за оригінальною методикою проводили з використанням лабораторного приладу мод. 065.

Обробку експериментальних даних проводили із застосуванням загальноприйнятих статистичних методів.

У третьому розділі наведені результати досліджень з вивчення властивостей НТФ, закономірності їх формування та результати оптимізації складу суміші для НТФ з досліджених у роботі матеріалів.

Відповідно до завдань в роботі використовували пісок марки 1К₃О₃016 Вільногірського родовища, каолінову глину марки С2Т₂ Просяновського родовища та бентонітову глину марки С2Т₂ Дашуковського родовища. Встановлено, що найбільшу обсипальність (3,8...4,1 %) мають НТФ з піску і води. При цьому, з пониженням температури і підвищенням вмісту води в піску до 18 % міцність НТФ збільшується, що зумовлено завершенням насичення піску водою, та знижується при більш високому вмісту води.

Додавання бентонітової та каолінової глини призводить до зменшення обсипальності таких НТФ у 8 разів та у 2,5 рази відповідно. Збільшення вологості глиновмісної суміші з 3 до 6 % (за масою) знижує її газопроникність з 115...120 од до 80...95 од, але збільшує плинність з 47 до 61 % для бентонітової глини і з 46 до 50 % для каолінової глини. При цьому збільшення

води більше 5 % у сумішах з 5 % бентонітової або каолінової глини не призводить до збільшення їх плинності. Крім того, зменшення води у таких сумішах призводить до підвищення їх обсіпальності та зменшення міцності. Тому, з метою зменшення втрати води у поверхневих шарах НТФ при заморожуванні, початкова температура в камері морозильної установки повинна дорівнювати кінцевій температурі заморожування НТФ.

Для виявлення впливу різних видів води та глини дослідили властивості НТФ, склад яких наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Склади НТС та властивості НТФ

№	Пісок, %	Глина, (5 %)	Час контакту з водою, год.	Підготовка води (5 %)	Властивості при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$	
					$\sigma_{\text{ст}}$, МПа	Обсіпальність, %
1	90	Бентоніт	24	К	3,69-5,22	0,05-0,11
2				В	0,54-0,59	0,01-0,12
3				CO ₂	0,22-0,25	
4			0,1	К	0,98-1,09	
5				В	0,34-0,41	0,60-0,65
6				CO ₂	3,00-3,11	1,05-1,15
7		Каолін	24	К	0,83-0,87	
8				В	1,95-2,01	1,14-1,22
9				CO ₂	0,16-0,20	
10			0,1	К	0,53-0,57	
11				В	0,95-1,02	0,77-0,82
12				CO ₂	3,00-3,08	3,44-4,00
13	95	нема	0,1	В	0,10-0,12	3,80-3,90

Примітка: К – вода кип'ячена; В – вода водопровідна; CO₂ – вода газована

Аналіз отриманих даних показує, що найбільшу міцність на стиск (3,69...5,22 МПа) мають зразки з формувальної суміші № 1 (з кип'яченою водою). Зразки з формувальних сумішей № 6 і 12 (газована вода) мають однаково високі показання міцності на стиск ~ 3 МПа. Найгірші показники обсіпальності та міцності мають глиновмістні зразки з водопровідною водою та суміш з чистого піску та води. Це зумовлено структурою сумішей, що витікає з рис. 1, де надано структури заморожених сумішей глини з водою при їх рівному масовому співвідношенні.

З рис. 1 випливає, що зі збільшенням вмісту газів у воді (від кип'яченої до водопровідної та газованої води) структура замороженої водно-глинистої суміші стає більш рихлою, розміри дендритів льоду, що пронизують глину, істотно збільшуються. При цьому розміри кристалів льоду в каоліновій глині

значно більші розмірів дендритів в бентонітовій глині. Тобто, такий рівень властивостей суміші №1 на кип'яченій воді зумовлено щільною структурою бентонітової глини. Високий рівень властивостей сумішей на газованій воді з ненабряклого глиною пояснюється можливим утворенням середньої солі – карбонату алюмінію, який зміцнює глину та виникає у разі хімічної реакції між глиною та CO_2 при 0°C .

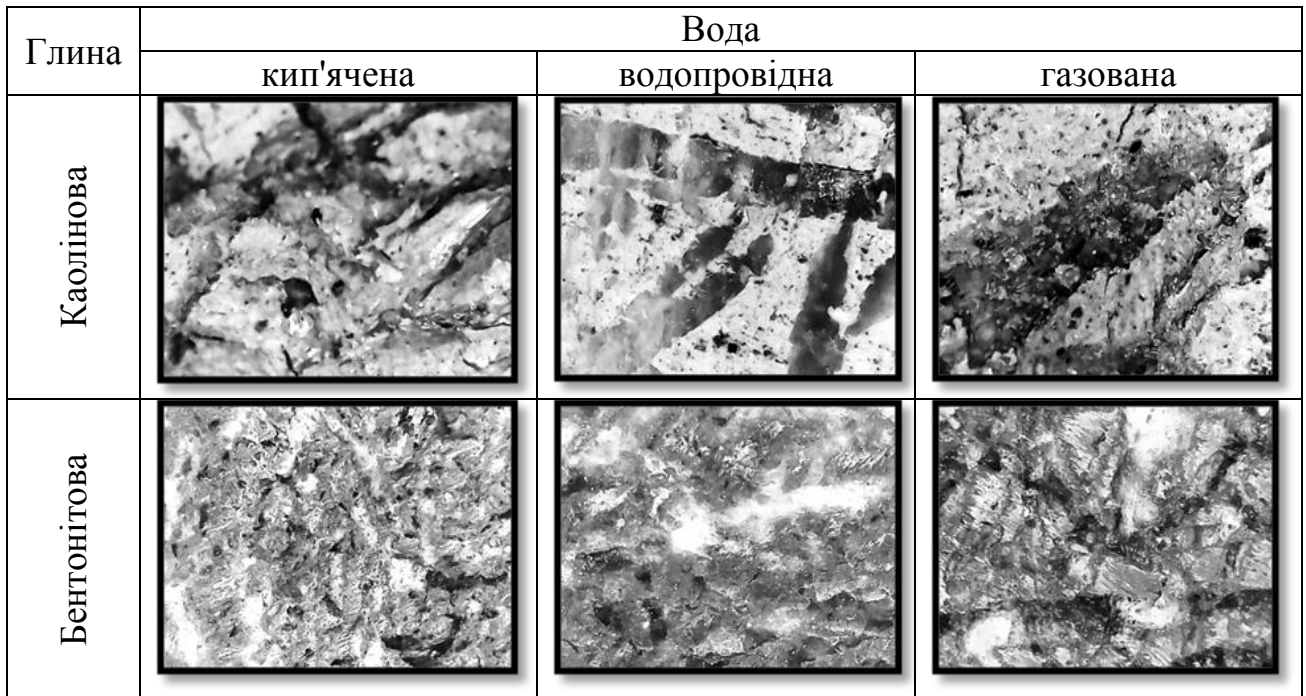


Рисунок 1 – Структури заморожених сумішей глини та води ($\times 10$)

Дослідження кінетики руйнування НТФ при витримці на повітрі з додатною температурою та динамічним впливом показали (див. рис. 2, табл. 1), що живучість зразків з піску та води, а також з піску, води і каолінової глини становить 6 хв, а з ненабряклого бентонітовою глиною – 10 хв. У той же час цей показник складає 18...22 хв для зразків з набряклого бентонітовою глиною та кип'яченою водою, що свідчить по найбільшій технологічності таких сумішей.

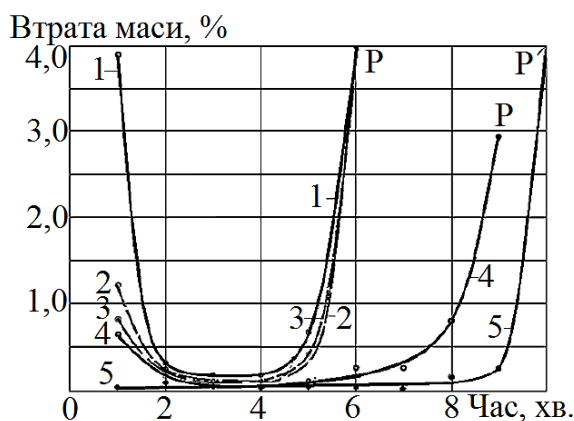


Рисунок 2 – Кінетичні криві руйнування зразків під динамічним впливом:
 1 – без глини;
 2 – каолінова набрякла глина;
 3 – каолінова ненабрякла глина;
 4 – бентонітова ненабрякла глина;
 5 – бентонітова набрякла глина

Виходячи з отриманих результатів у кінетиці руйнування зразків НТФ можна виділити три етапи, що схематично надано на рис. 3.

Етап 1 (на рис. 3 – ділянка А-В, час $0 \dots \tau_1$) – інтенсивне руйнування поверхні (втрата маси) зразка, яке викликане зниженою міцністю поверхневого шару суміші через зменшення вмісту в ньому води через її випаровування під час заморожування формувальної суміші. У разі високої міцності НТФ характер зміни маси зразка в період часу $0 \dots \tau_1$ описується кривою А'-В і є наслідком втрати міцності сумішшю, зумовленою нагріванням зразка і таненням льоду в його поверхневому шарі.

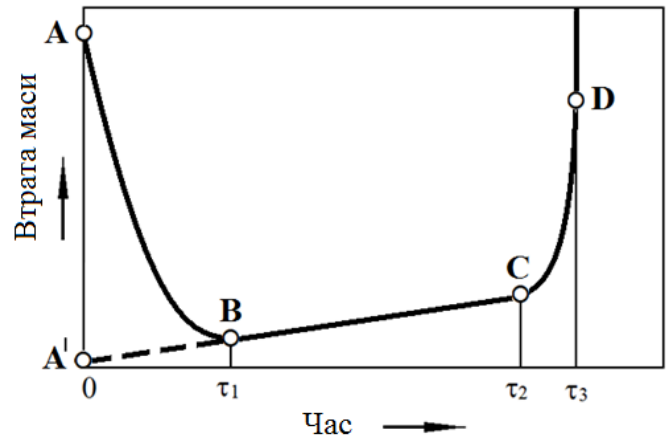


Рисунок 3 – Кінетична крива руйнування зразків НТФ

Етап 2 (на рис. 3 – ділянка В-С, час $\tau_1 \dots \tau_2$) – монотонне збільшення швидкості руйнування поверхневого шару зразка, зумовлене подальшим нагріванням зразка, яке призводить до танення і зниження міцності льоду в його поверхневому шарі.

Етап 3 (на рис. 3 – ділянка С-D, час $\tau_2 \dots \tau_3$) – катастрофічно швидке руйнування зразка з його розпадом на окремі великі фрагменти. Перехід від монотонного до катастрофічного характеру руйнування НТФ обумовлений підвищенням температури замороженої суміші до критичної позначки, коли міцність нагрітого льоду в усьому об'ємі зразка не в змозі протистояти динамічному впливу на зразок і забезпечити його цілісність.

На основі отриманих даних провели оптимізацію складу і умов виготовлення НТФ на основі кварцового піску, ненабряклої бентонітової глини і водопровідної води. Параметри, що оптимізували (температура – T , масова частка бентонітової глини – $G_{\text{гл}}$ і водопровідної води – B), їх коди та межі змін в дослідженнях наведені в табл. 2.

Оптимізацію здійснювали шляхом накладення симплекс-решіток, отриманих за результатами реалізації симплекс-решітчастого плану Г. Шеффе та розрахунком коефіцієнтів регресії у рівнянні:

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3, \\ \beta_1 = \zeta_1, \beta_{ij} = 4 \cdot \zeta_{ij} - 2 \cdot \zeta_i - 2 \cdot \zeta_j, \beta_{123} = 27 \cdot \zeta_{123} - 12 \cdot (\zeta_{12} + \zeta_{13} + \zeta_{23}) + 3 \cdot (\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3), \quad (1)$$

де $\zeta_i, \zeta_j, \zeta_{ij}, \zeta_{123}$ – результати дослідів в точках симплексних решіток; x – кількість матеріалу в складі (за масою), величина температури.

Таблиця 2 – Параметри, що оптимізували, їх коди та межі їх змін

п/п	Код	Параметр			п/п	Код	Параметр		
		Т	Гл	Вл			Т	Гл	Вл
		°С	%				°С	%	
1	X ₁	-20	3	3	5	X ₁₃	-15	7	7
2	X ₂	-10	7	7	6	X ₂₃	-20	5	5
3	X ₃	-20	7	7	7	X ₁₂₃	-16,6	5,6	5,6
4	X ₁₂	-15	5	5					

Результати оптимізації наведені на рис. 4 з яких випливає, що оптимальним вмістом ненабряклої бентонітової глини і водопровідної води в НТФ з кварцового піску марки 1К₃О₃016 є по $5 \pm 0,2$ % кожного при початковій температурі не вище $-19 \dots -20$ °С, який забезпечує НТФ: $\sigma_{CT} = 1,0 \dots 1,1$ МПа; $\Gamma = 90 \dots 95$ од; $O_c \leq 0,2$ %; плинність при $+20$ °С – $57 \dots 60$ %.

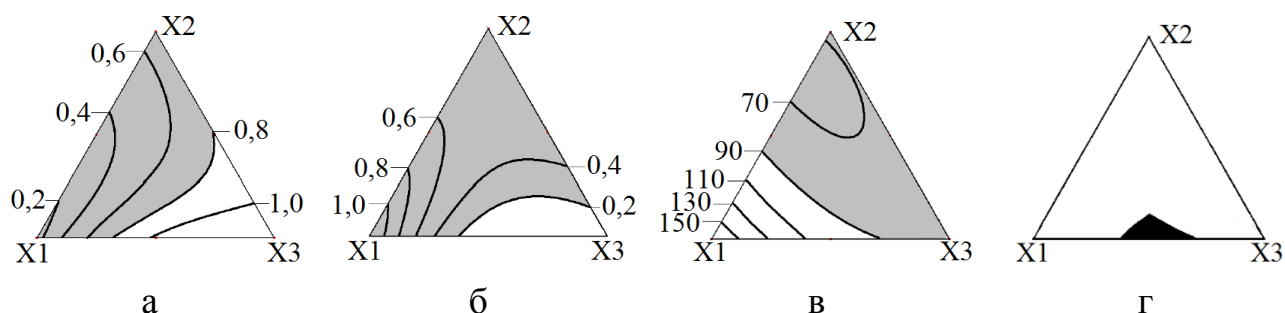


Рисунок 4 – Межа міцності на стиск, МПа (а); обсіпальність, % (б); газопроникність, од (в); оптимальна область (затемнена) в концентраційній сітці симплекс-решітки (г)

При цьому, зі збільшенням вмісту в суміші води і глини міцність суміші підвищується, а обсіпальність і газопроникність знижуються.

В четвертому розділі досліджували закономірності взаємодії розробленої суміші з розплавом алюмінієвого сплаву АК5М2. Для виявлення закономірностей в співвідношеннях розмірів елементів ливникової системи, спрямованих на попередження появи засмічень, були змодельовані вилівок і його ливникова система (рис. 5, а). В дослідженнях у місці найбільш термічної «навантаженості» (на галтелі живильника) встановлювали гіпотетичну і реальну ХА-термопару (на рис. 5, а, f – гарячий спай термопар).

Використовуючи дані моделювання, розробили відповідну математичну модель і побудували симплекс-номограму (рис. 5, б),

використання яких в першому наближенні дозволяє розрахувати не тільки розміри і кількість живильників, а й час заливки НТФ сплавом на основі алюмінію.

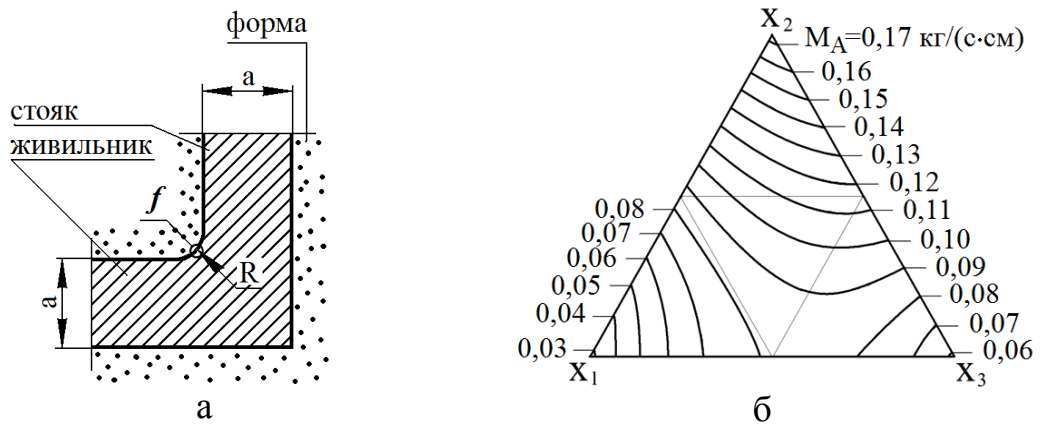


Рисунок 5 – Схема розташування термопари (а) та симплекс-номограма (б), де значення X_1 , X_2 та X_3 надано в табл. 2

Умова збереження цілісності поверхні форми при перебігу в ній розплаву, що використали для розрахунків, має вигляд:

$$\tau_{меч} \leq \tau_s, \quad (2)$$

де $\tau_{меч}$ – тривалість перебігу розплаву в області зовнішнього прямого кута форми; τ_s – тривалість існування кірки металу на зовнішньому прямому куті форми.

Максимально-припустиму масу розплаву, що пройшла через живильник, перерахували з розрахунку даного показника на один погонний сантиметр ширини живильника:

$$M_A = \frac{10M}{\tau_s a}, \quad (3)$$

$$M = F \cdot w \cdot \rho \cdot \tau_s, \quad (4)$$

де F – площа поперечного перерізу живильника, m^2 ; w – середня швидкість течії розплаву в живильнику, m/s ; ρ – питома щільність розплаву при його перегріві на $120^\circ C$, kg/m^3 .

$$M_p = \frac{G}{\tau} = \frac{G^{0,57}}{0,19553 \cdot \delta^{0,33}}. \quad (5)$$

де G – маса вилівка, kg ; δ – середня товщина стінки вилівка, m .

За результатами досліджень встановлено, що рідиноплинність сплаву АК5М2 в НТФ на 20...25 % вище, ніж в ПГФ, що, ймовірно, виникає внаслідок

утворення на межі «метал – НТФ» парогазової сорочки і підвищеної газопроникності форми. Результати досліджень впливу ПГФ та НТФ при масовій частці води та глини 5 % кожного на вільну і утруднену лінійну усадку виливків зі сплаву АК5М2 надані на рис. 6, а на рис. 7 надано гістограму передусадкового розширення виливків балочного типу у різних формах.

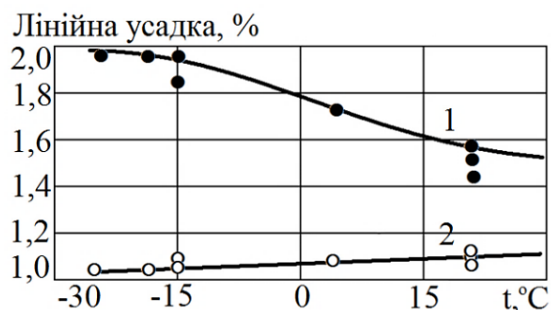


Рисунок 6 – Залежність початкової температури форми на лінійну усадку: 1 – вільна; 2 – утруднена

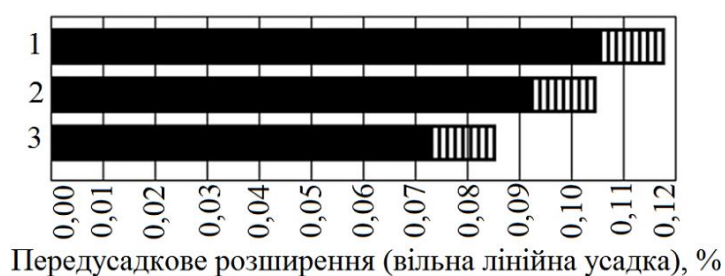


Рисунок 7 – Передусадкове розширення виливків у ливарній формі:

1 – ПГС при + 20 °C;
2 – НТС при – 20 °C;
3 – НТС при – 40 °C

З отриманих даних витікає, що основними чинниками, що впливають на перебіг процесів вільної і утрудненою лінійної усадки в НТФ, є жорсткість форми і її теплоакумулююча здатність. При цьому зі зниженням температури форми передусадкове розширення сплаву АК5М2 зменшується з 0,11 % для форми з температурою +20 °C до 0,08 % для форми з температурою –40 °C.

Виливки зі сплаву АК5М2, залиті в НТФ оптимізованого складу при –40 °C мають 5 клас чистоти поверхні, а в НТФ з температурою –20 °C – 4 клас чистоти. Тобто, підвищення початкової температури НТФ призводить до зменшення чистоти поверхні виливків. Найбільша розмірна точність (див. рис. 8.) у виливках отриманих в кокіль (73 % виливків без значних відхилень у розмірній точності). Доля таких виливків, що були виготовлені в НТФ, склала 58 %, у ПГФ – 7 %.

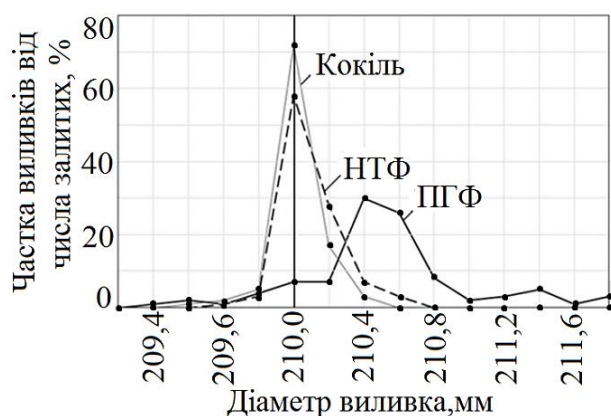


Рисунок 8 – Криві розподілу значень величини зовнішнього діаметра (номінальна величина Ø 210 мм) виливка «Диск»

Аналіз мікроструктур виливків зі сплаву АК5М2, наданих на рис. 9, показує, що у виливків в НТФ і ПГФ мікроструктура практично однакова, а частка β -Si найбільша в структурі виливків, залитих в кокіль.

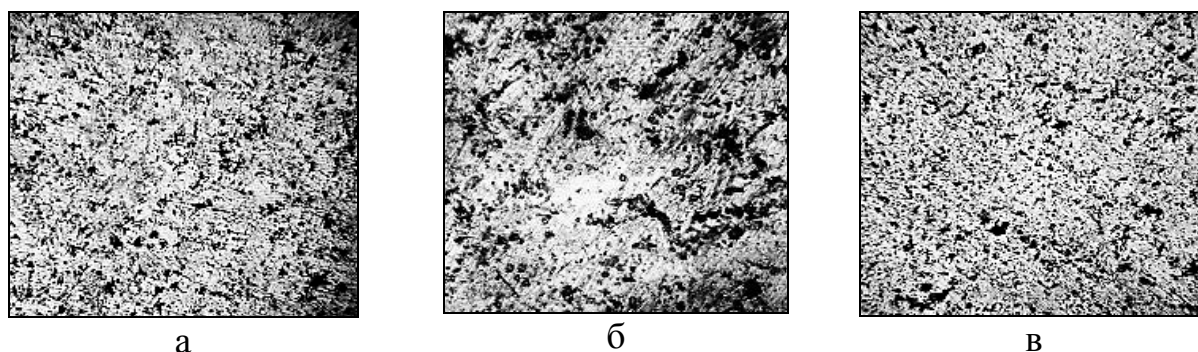
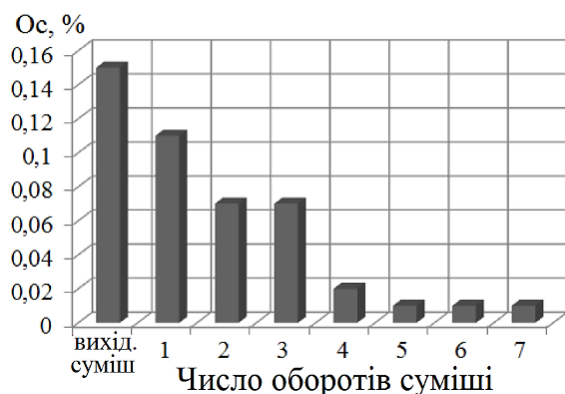
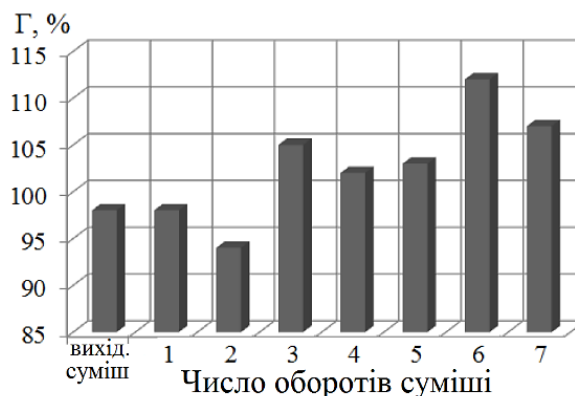


Рисунок 9 – Мікроструктури ($\times 400$) зразків зі сплаву АК5М2, відлитих в НТФ при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а), в ПГФ при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б), в кокіль при $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в)

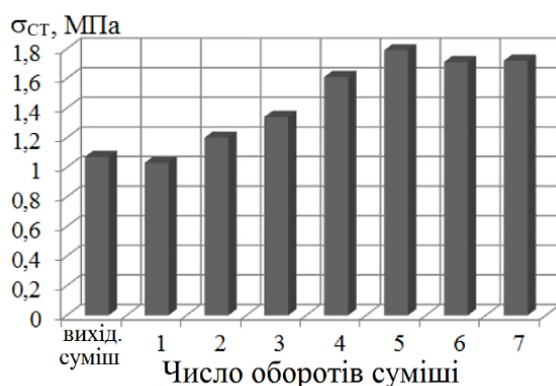
Одним з показників живучості будь-якої суміші є можливість її повторного використання. З цією метою визначали властивості НТФ після 7 оборотів її використання для лиття виливків з алюмінієвих сплавів. Результати визначення властивостей надані на рис. 10, з яких випливає, що застосування оборотної суміші покращує її властивості при підтримуванні відповідного рівня її вологості.



а



б



в

Рисунок 10 – Властивості НТС оптимізованого складу після її контакту з розплавом алюмінієвого сплаву АК5М2:
а – обсипальність;
б – газопроникність;
в – міцність на стиск

Промислове випробування результатів роботи проводили в ливарному цеху підприємства ДП «ІЦЛПТ» (м. Одеса) на виливку-представнику «Кришка». Аналіз зовнішнього вигляду отриманих виливків показує, що при литті з низькою питомою швидкістю заливки відбувається розмиття НТФ в області галтелі і поява невеликих засмічень в виливках в області фланця. У той же час при заливці НТФ при розрахункових параметрах цих дефектів на виливках не спостерігалось (рис. 11).



Рисунок 11 – Виливок-представник «Кришка» зі сплаву АК5М2

За результатами вимірювань розмірів виливків встановлено, що в порівнянні з аналогічними виливками, виготовленими в ПГФ, в виливках-представниках розмірна точність підвищилася на 60...75 %.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведені теоретичні та технологічні узагальнення в рамках рішення науково-технічної проблеми підвищення і стабілізації розмірної точності виливків з алюмінієвих сплавів загальномашинобудівного призначення, які виготовляють в низькотемпературних екологічно безпечних формах, шляхом визначення закономірностей формування властивостей і кінетики руйнування форм, оптимізації складу суміші, що зумовлює підвищення і стабілізацію точності лиття і, відповідно, скорочення тривалості і об'єму подальших технологічних операцій.

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень в області технології лиття в НТФ були знайдені нові наукові рішення, отримані нові практичні результати і зроблені наступні висновки.

1. Аналіз сучасних технологій виробництва та якості виливків загальномашинобудівного призначення, науково-технічної та патентної літератури показав, що робота, яка спрямована на розробку наукових і технологічних основ виготовлення НТФ для лиття виливків з алюмінієвих сплавів, зниження собівартості одержуваного литва шляхом багаторазового використання кварцового піску, а в якості сполучного – воду та глину, скорочення трудомісткості операцій формоутворення, вибивки форм і стрижнів, поліпшення екологічних умов праці на виробництві, є актуальною.

2. У роботі використані стандартні методи, апаратура і оригінальні методики, які дозволили встановити об'єктивний зв'язок між досліджуваними параметрами. На основі стандартних методів досліджень розроблені методики, що дозволяють провести якісну та кількісну оцінку технологічних

пара метрів виготовлення НТФ.

3. Для запобігання підвищення обсіпання і зниження механічних властивостей поверхневого шару форми в результаті втрати води при об'ємному заморожуванні необхідно виконувати попереднє охолодження робочих об'ємів морозильної камери до величини вихідної температури НТФ.

4. Формувальні суміші, що складаються з піску марки 1К₃О₃016 Вільногірського родовища (Україна) і води для виготовлення НТФ непридатні в зв'язку з їх неприпустимою обсіпальністю.

5. Для підвищення міцності і зниження обсіпальності для виробництва НТФ слід використовувати суміш піску марки 1К₃О₃016 Вільногірського родовища (Україна) з 5 % водопровідної води і 5 % бентонітової глини при початковій температурі не вище -19...-20 °С.

6. Природа глини, її вміст в формувальній суміші, а також спосіб підготовки води і глини до формування мають вирішальний вплив на міцність і обсіпальність НТФ. Найбільшу міцність та найменшу обсіпальність має суміш піску з 5 % кип'яченої води і з 5 % набряклої бентонітової глини. Трохи нижче аналогічні показники у сумішей з ненабряклими глинами та газованою СО₂ водою. Середню міцність і одну з найменших обсіпальностей має суміш піску з 5 % водопровідної води і з 5 % набряклої бентонітової глини.

7. Досліджено кінетику і розроблено опис етапів руйнування НТФ в умовах динамічного впливу на них. Вирішальними параметрами НТФ з точки зору її руйнування в умовах динамічного впливу є природа глини та вміст газів, що розчинені у воді. З цієї точки зору найбільш технологічними є НТФ з 90 % кварцового піску, 5 % кип'яченої води і 5 % набряклої бентонітової глини.

8. Тривалість існування первинної ливарної кірки на галтелі живильника зростає з пониженням швидкості течії розплаву в живильнику, а також зі збільшенням радіуса галтелі і товщини живильника. У той же час, максимально-припустима маса розплаву, що пройшла через живильник з розрахунку на його погонний сантиметр, підвищується зі зростанням швидкості течії розплаву в живильнику, товщини живильника практично не залежить від радіуса галтелі.

9. Невисоке передусадкове розширення виливків в НТФ в порівнянні з виливками, що виготовляються в ПГФ, свідчить про низьку ймовірність виникнення в виливках гарячих тріщин.

10. Зниження температури форми з вологістю 5...10 % від +20 до -20 °С призводить до зростання вільної лінійної усадки від 1,48...1,5 % до 1,54...1,88 %. У той же час, утруднена лінійна усадка зменшується від 1,22...1,28 % до 1,14...1,22 %. Тобто основними чинниками, що впливають на протікання процесів вільної і утрудненої лінійної усадки в НТФ є жорсткість форми і її теплоакумулююча здатність.

11. При литті в НТФ найбільша рідиноплинність алюмінієвих сплавів спостерігається при -20 °С. При цьому зі зниженням початкової

температури НТФ шорсткість поверхні виливків зі сплаву АК5М2 знижується, тобто підвищується клас чистоти їх поверхні від 4-го класу при початковій температурі НТФ -20°C до 5-го класу при початковій температурі НТФ -40°C .

12. Розроблені аналітичні залежності та симплекс-номограма для розрахунку розмірів живильників ливникової системи у НТФ при їх заливанні розплавом алюмінієвого сплаву. В порівнянні з виливками, що виготовляють в ПГФ, це дозволить скоротити дефектність лиття по засміченню.

13. Результати промислового випробування розробленого складу НТС на основі кварцового піску Вільногірського родовища і рекомендацій по конструюванню ливників при литті алюмінієвих сплавів в НТФ свідчать про те, що мета, поставлена в даній роботі, досягнута.

14. Наукові та технологічні результати роботи використовуються в навчальному процесі студентів на кафедрі технології та управління ливарними процесами Одеського національного політехнічного університету при викладі відповідних розділів лекційних курсів в дисциплінах: «Теоретичні основи ливарного виробництва», «Моделювання та оптимізація технологічних систем», «САПР ливарних технологій».

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ ВИКЛАДЕНО У ПУБЛІКАЦІЯХ:

Монографія:

1. Шинский О.И. Низкотемпературные литейные формы: монография / О.И. Шинский, Т.В. Лысенко, И.В. Прокопович, Н.И. Замятин, Л.И. Солоненко. – Одесса: Фенікс, 2017. – 248 с.

Статті у фахових виданнях:

2. Shinskiy O.I. Physical properties of low-temperature casting moulds / O.I. Shinskiy, V.O. Shinskiy, T.V. Lysenko, L.I. Solonenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2017. – №5. – P. 33–35. (Index Copernicus).

3. Шинский О.И. Низкотемпературный холодильный комплекс для замораживания литейных форм и стержней / О.И. Шинский, Т.В. Лысенко, В.В. Ясюков, Л.И. Солоненко, Д.С. Васильев // Металл и литье Украины. – 2016. – № 7. – С. 21–25.

4. Ясюков В.В. Композиционные вставки пресс-форм литья под давлением / В.В. Ясюков, Л.И. Солоненко, О.В. Цыбенко // Металл и литье Украины. – 2015. – №9. – С. 26–29.

5. Шинский О.И. Влияние состава, дисперсности и температуры охлаждения формовочных материалов на прочностные свойства низкотемпературных форм / О.И. Шинский, Т.В. Лысенко, Л.И. Солоненко // Металл и литье Украины. – 2016. – № 11–12. – С. 19–23.

6. Лысенко Т.В. Анализ и синтез физико-химического воздействия на эксплуатационную надежность отливок / Т.В. Лысенко, В.В. Ясюков, Л.И. Солоненко, В.А. Чередник // Металл и литье Украины. – 2016. № 8–10. – С. 17–21.

7. Ясюков В.В. Кинетика затвердевания сплава при большой интенсивности

тепломасообмена низкотемпературных форм / В.В. Ясюков, Т.В. Лысенко, Л.И. Солоненко // *Металл и литье Украины*. – 2018. – № 1–2. – С. 34–39.

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

8. Tatyana Lysenko. Argument for rational technology of shaping for armature castings from iron-carbon alloys / Tatyana Lysenko, Lyubov Bovnegra, Lyudmila Solonenko // 7th International Conference “Economics and Management based on New Technologies” – EMoNT-2017. – Vrnjacka Banja, Serbia. – 2017. – P. 262–270.

9. Tatyana Lysenko. Quality management of castings of pipeline armature / Tatyana Lysenko, Lyubov Bovnegra, Vladimir Tonkonogyi, Lyudmila Solonenko // 8th International Conference “Economics and Management based on New Technologies” – EMoNT-2018. – Vrnjacka Banja, Serbia. – 2018. – P. 274–281.

10. Лисенко Т.В. Низкотемпературный холодильный комплекс для замораживания литейных форм и стержней / Т.В. Лисенко, О.И. Шинский, Л.И. Солоненко // XII Международная научно-практическая конференция «Литье-2016», V Международная научно-практическая конференция «Металлургия-2016». – Запорожье. – 2016. – С. 144–146.

11. Ясюков В.В. Процессы кристаллизации при наложении давления и охлаждения на жидкий металл отливки / В.В. Ясюков, Т.В. Лысенко, Л.И. Солоненко // *Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві»*. – Краматорськ: ДДМА. – 2017. – С. 154–155.

12. Ясюков В.В. Инновационные технологии формирования качественного поверхностного слоя отливки / В.В. Ясюков, Т.В. Лысенко, Л.И. Солоненко // *Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві»*. – Краматорськ: ДДМА. – 2017. – С. 152–154.

13. Ясюков В.В. Повышение эксплуатационной надежности отливки за счет улучшения качества поверхности / В.В. Ясюков, Т.В. Лысенко, Л.И. Солоненко // XIV Міжнародна науково-практична конференція «Литво 2018»; VII Міжнародна науково-практична конференція «Металургія 2018». – Запоріжжя. – 2018. – С. 223–224.

14. Лысенко Т.В. Прочностные свойства низкотемпературных форм / Т.В. Лысенко, О.И. Шинский, Л.И. Солоненко, Д.С. Васильев // *Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні»*. – Київ. – 2016. – С. 89–90.

Навчальний посібник:

15. Лисенко Т.В. Теоретичні основи формування виливків. Навчальний посібник / Т.В. Лисенко, О.І. Пономаренко, В.П. Доценко, Л.И. Солоненко. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – 191 с.

АНОТАЦІЯ

Солоненко Людмила Ігорівна. Теоретичні та технологічні основи виготовлення виливків з алюмінієвих сплавів в екологічно безпечні низькотемпературні кварцові форми. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.16.04 – Ливарне виробництво. – Одеський національний політехнічний університет Міністерства освіти і науки України, м. Одеса, 2018 – Національна металургійна академія України Міністерства освіти і науки України, м. Дніпро, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розробці теоретичних та технологічних основ виготовлення низькотемпературних форм для литва загально-машинобудівного призначення із алюмінієвих сплавів для поліпшення якості виливків та зниження їх собівартості за рахунок скорочення трудомісткості операцій формоутворення, вибивання форм і стрижнів, поліпшення екологічних умов праці на виробництві та навколишнього середовища. Проаналізовано вплив вмісту води та глини (пісок марки 1K₃O₃016 – Вільногірського родовища, каолінова глина марки С2Т₂ Просяновського родовища, бентонітова глина марки С2Т₂ Дашуковського родовища, Україна), температури заморожування, а також спосіб підготовки глини (набряклої, ненабряклої) та води (кип'ячена, водопровідна, насичена СО₂) на властивості низькотемпературних форм. Виявлена кінетика руйнування низькотемпературних форм на повітрі при безперервному динамічному впливі на них. Проведена оптимізація складу низькотемпературної суміші.

Розроблено математичну модель і побудовано симплекс-номограму, використання якої в першому наближенні дозволяє розрахувати не тільки розміри і кількість живильників, а й час заливки низькотемпературної форми сплавом на основі алюмінію.

Досліджена взаємодія низькотемпературної форми з розплавом із алюмінієвого сплаву АК5М2, встановлено вплив низькотемпературної форми на якість поверхні, точність розмірів, мікроструктуру виливків з алюмінієвих сплавів. Отримані результати свідчать, що навіть використання оборотної формувальної суміші оптимізованого складу (90 % по масі кварцового піску Вільногірського родовища і по 5 % водопровідної води і бентонітової глини) при температурі НТФ не вище -19...-20 °С, в порівнянні з піщано-глинистою сумішшю дозволяє значно підвищити розмірну точність і чистоту поверхні (до 4 класу чистоти по ГОСТ 26645) виливків з алюмінієвих сплавів.

Ключові слова: глина, пісок, вода, лід, кварцова форма, властивості, газопроникність, міцність, мікроструктура.

АННОТАЦИЯ

Солоненко Людмила Игоревна. Теоретические и технологические основы изготовления отливок из алюминиевых сплавов в экологически безопасные низкотемпературные кварцевые формы. - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.16.04 – Литейное производство. – Одесский национальный политехнический университет Министерства образования и науки Украины, г. Одесса, 2018 – Национальная металлургическая академия Украины Министерства образования и науки Украины, г. Днепр, 2018.

Диссертационная работа посвящена разработке теоретических и технологических основ изготовления низкотемпературных форм для литья общемашиностроительного назначения из алюминиевых сплавов с целью улучшения качества отливок и снижения их себестоимости. Поставленная цель достигается за счет сокращения трудоемкости операций формообразования, выбивки форм и стержней из отливок, улучшения экологических условий труда на производстве и окружающей среды.

Проведен анализ влияния содержания воды и глины, температуры замораживания, а также способ подготовки глины и воды на свойства низкотемпературных форм. Выявлена кинетика разрушения низкотемпературных форм на воздухе при комнатной температуре и непрерывном динамическом воздействии на них. Проведена оптимизация состава низкотемпературной смеси.

Разработана математическая модель и построена симплекс-номограмма, использование которой в первом приближении позволяет рассчитать не только размеры и количество питателей, но и время заливки низкотемпературной формы сплавом на основе алюминия.

Исследовано взаимодействие низкотемпературной формы с расплавом алюминиевого сплава АК5М2, установлено влияние низкотемпературной формы на качество поверхности, точность размеров, микроструктуру отливок из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: глина, песок, вода, лед, кварцевая форма, свойства, газопроницаемость, прочность, микроструктура.

SUMMARY

Solonenko Lyudmila Igorivna. Theoretical and technological foundations for manufacturing castings from aluminum alloys in environmentally friendly low-temperature quartz forms. - Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences (Ph.D.) in specialty 05.16.04 – Foundry.– Odessa National Polytechnic University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2018 – National Metallurgical Academy of Ukraine, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnepr, 2018.

The thesis is devoted to the development of theoretical and technological foundations for the manufacture of low temperature molds for casting a general machine - building application from aluminum alloys to improve the quality of castings and reduce their prime cost by reducing the complexity of molding operations, knocking out forms and rods, improving environmental working conditions in the workplace and the environment. The influence of water and clay content, freezing temperature, and also the way of preparation of clay and water on the properties of low-temperature forms are analyzed. The kinetics of the destruction of low-temperature forms in air under continuous dynamic influence on them is revealed. The composition of the low-temperature mixture was optimized.

The mathematical model is developed and a simplex-monograms is constructed, the use of which, as a first approximation, makes it possible to calculate not only the sizes and number of feeders, but also the time of pouring a low-temperature shape with an aluminum-based alloy.

The interaction of the low-temperature form with the melt of an aluminum alloy is investigated, the influence of a low-temperature shape on the quality of the surface, the dimensional accuracy, the microstructure of castings from aluminum alloys is determined.

Key words: clay, sand, water, ice, quartz form, properties, gas permeability, strength, microstructure.