

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Солоненко Людмила Ігорівна**

УДК 621.742.4

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

Спеціальність 05.16.04 – Ливарне виробництво

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_Л.І. Солоненко

Науковий керівник – ЛИСЕНКО Т.В. доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2018

## 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 теоретичним та технологічним узагальненням в рамках рішення науково-технічної проблеми підвищення і стабілізації розмірної точності виливків з алюмінієвих сплавів загально машинобудівного 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 та отримані нові практичні результати.

Встановлено закономірності комплексного впливу компонентів НТС, виготовленої на основі кварцового піску та глини, відповідно, Вільногірського, Просяновського та Дашуковського родовищ (Україна), їх природи, особливостей підготовки до використання і умов виготовлення НТФ на їх властивості. Для підвищення міцності і зниження обсіпальності для виробництва НТФ слід використовувати суміш піску марки 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>016 Вільногірського родовища з 5% водопровідної води і 5% бентонітової глини при початковій температурі не вище –19...–20 °С. 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 суміші піску з 5% кип'яченої води і з 5% набряклої бентонітової глини. Трохи нижче аналогічні показники у сумішей з ненабряклими глинами та газованою  $\text{CO}_2$  водою. Середню міцність і одну з найменших обсіпальностей має суміш піску з 5% водопровідної води і з 5% набряклої бентонітової глини.

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

Для виливків з алюмінієвих сплавів встановлені закономірності впливу співвідношень розмірів елементів ливникової систем, параметрів виливка 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. 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. Розроблені аналітичні залежності та симплекс-номограми, використання яких дозволяє розрахувати розміри живильників ливникової системи виходячи з умов заливки НТФ розплавом алюмінієвого сплаву. Це, в порівнянні з виливками, що

виготовляють в ПГФ, дозволило не тільки підвищити точність розмірів виливків в 2,5...3,0 рази, але скоротити дефектність лиття по засміченню більш ніж у 8 разів.

Для сплаву АК5М2 встановлені закономірності впливу НТС, виготовленої на основі піску Вільногірського та глини Дашуковського родовища, на його ливарні властивості та якість виливків. Невисоке передусадкове розширення виливків в НТФ в порівнянні з виливками, що виготовляються в ПГФ, свідчить про низьку ймовірність виникнення в виливках гарячих тріщин. 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. При литті в НТФ найбільша рідиноплинність алюмінієвих сплавів спостерігається при -20 °С. При цьому зі зниженням початкової температури НТФ жорсткість поверхні виливків зі сплаву АК5М2 знижується, тобто підвищується клас чистоти їх поверхні від 4-го класу при початковій температурі НТФ -20 °С до 5-го класу при початковій температурі НТФ -40 °С.

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

## ABSTRACT

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 of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2018.

The thesis is devoted to the theoretical and technological generalization within the solution of scientific and technical problems increase and stabilize the dimensional accuracy of castings of aluminum alloys generally machine-build purpose, producing a low-temperature environment-friendly forms by identifying patterns of properties and kinetics of destruction forms, optimizing the composition of the mixture, which leads to the increase and stabilization of the accuracy of casting and, accordingly, the reduction of the duration and volume of further technological operas.

As a result of theoretical and experimental research in the field of casting technology in NTF, new scientific solutions and new practical results were found.

The regularities of complex effects LTM components manufactured from quartz sand and clay respectively of Vilnohirsk, Prosyanovsk Dashukovsk deposits (Ukraine), their nature, characteristics and use of preparations for manufacturing LTF conditions on their properties. To improve durability and reduce manufacturing surfacing LTF to use a mixture of sand marks 1K<sub>3</sub>O<sub>3</sub>016 Vilnohirsk field of water and 5% bentonite clay at an initial temperature no higher than –19 ...–20 °C. The nature of the clay, its content in the molding mixture, as well as the method of preparation of water and clay for formation have a decisive influence on the strength and obtuse of LTF. The greatest strength and the least blooming is the mixture of sand from 5% boiled water and 5% edible bentonite clay. Slightly below similar rates in mixtures with non-clay clays and carbonated CO<sub>2</sub> water. The average strength and one of the smallest scum has mixes of sand with 5% of tap water and 5% of edible bentonite clay.

The regularities of kinetics of destruction of LTF pre-cooled down to –15 °C at an ambient temperature + 20±1°C and continuous dynamic influence on them are established. The kinetics was studied and the description of the stages of destruction of LTF in the conditions of dynamic influence on them was developed.

The decisive parameters of the LTF in terms of its destruction in conditions of dynamic influence are the nature of the clay and the content of gases dissolved in water. From this point of view, the most technologically is LTF with 90% quartz sand, 5% boiled water and 5% edible bentonite clay.

For casting aluminum alloy installed regularities of relations dimensions of gate systems, casting parameters and conditions to fill the maximum permissible mass-melt passed through a linear centimeter of width of the feeder within 0,025...0,174 kg/(s·sm) and the destruction of LTF at its pouring. The duration of existence of the primary foundry crust on the feeder's grooves increases with a decrease in the flow rate of the melt in the feeder, as well as with an increase in the radius of the fillets and the thickness of the feeder. At the same time, the maximum permissible weight melt passed through feeder per linear centimeter of it, increases with increasing flow velocity of the melt in the feeder, the feeder thickness does not depend on the radius fillets. The analytical dependences and simplex-monograms are developed, the use of which allows to calculate the sizes of feeders of the flood system based on the conditions of pouring LTF by melting of an aluminum alloy. This, in comparison with castings made in PGF, allowed not only to increase the accuracy of the sizes of castings in 2,5...3,0 times, but to reduce the defect casting on the clogging more than 8 times.

For the AK5M2 alloy, the laws of the influence of LTS, made on the basis of the sand of Vilnogorsk and Dashukovsk clay, on its casting properties and the quality of castings are established. The low pre-expansion expansion of the castings in the LTF compared to the castings produced in the SCP, indicates a low probability of hot rolling cracks. Reducing the temperature of the mold with a humidity of 5...10% from +20 to -20 °C leads to an increase in free linear shrinkage from 1,48 ... 1,5% to 1,54 ... 1,88%. At the same time, the difficult linear shrinkage decreases from 1,22...1,28% to 1,14...1,22%. That is, the main factors affecting the processes of free and difficult linear shrinkage in the LTF are the stiffness of the shape and its heat-accumulation ability. When casting in LTF, the

highest fluidity of aluminum alloy is observed at  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . However with the starting temperature LTF surface roughness of alloy castings AK5M2 reduced, increases the surface cleanliness class of 4th class at LTF initial temperature of  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  to grade 5 at an initial temperature of  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  LTF.

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

#### Список публікацій здобувача

##### *Монографія:*

1. Шинский О.И. Низкотемпературные литейные формы: монография / [О.И. Шинский, Т.В. Лысенко, И.В. Прокопович и др.]. – 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 and etc.] // 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 и др.] // 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 и др.] // *Метал и литье Украины*. – 2016. № 8–10. – С. 17–21.

7. Ясюков В.В. Кинетика затвердевания сплава при большой интенсивности теплообмена 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 and etc.] // 7<sup>th</sup> 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 and etc.] // 8<sup>th</sup> 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 и др.] // 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 и др.] // 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 та ін.]. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – 191 с.

## ЗМІСТ

	стор.
АНОТАЦІЯ .....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	13
ВСТУП .....	16
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ВИРОБНИЦТВА ВИЛИВКІВ ЗАГАЛЬНОМАШИНОБУДІВНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ .....	24
1.1 Сучасні формувальні та стрижневі суміші для виготовлення виливків загальномашинобудівного призначення.....	24
1.2 Процеси формоутворення з використанням кріотехнологій.....	34
1.3 Сучасні способи виробництва низькотемпературних форм.....	37
1.4 Вимоги до сучасних формувальних і стрижневих сумішей.....	42
1.5 Мета та задачі досліджень.....	47
1.6 Висновки .....	48
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	49
2.1 Технологічна схема виготовлення НТС та НТФ .....	49
2.2 Визначення міцності на стиск .....	50
2.3 Визначення плинності формувальної суміші .....	50
2.4 Визначення газопроникності формувальної суміші .....	51
2.5 Визначення обсіпальності формувальної суміші .....	52
2.6 Визначення вологості замороженої формувальної суміші .....	53
2.7 Визначення щільності формувальної суміші .....	54
2.8 Статистична обробка експериментальних даних .....	54
2.9 Дослідження утрудненої та вільної лінійної усадки виливків.....	56
2.10 Дослідження передусадкового розширення при вільній лінійній усадці випливка з сплаву АК5М2.....	57
2.11 Визначення рідиноплинності алюмінієвого розплаву .....	59
2.12 Визначення шорсткості поверхні виливків.....	59
2.13 Дослідження мікроструктури сплаву АК5М2 при заливці в НТФ .....	59

2.14 Висновки .....	61
<b>РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ</b>	
<b>ВЛАСТИВОСТЕЙ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ФОРМ.....</b>	
3.1 Вплив вмісту глини та води на технологічні властивості низькотемпературної суміші.....	62
3.2 Вплив води на плинність піщано-глинистої формувальної суміші та міцність НТФ .....	65
3.3 Вплив режиму заморожування низькотемпературних форм на випаровування з них води .....	67
3.4 Вплив способу підготування води та глини на властивості НТФ .....	69
3.5 Дослідження кінетики руйнування НТФ при витримці на повітрі з додатною температурою та динамічним впливом.....	75
3.6 Оптимізація складу суміші для низькотемпературних форм.....	80
3.7 Висновки .....	85
<b>РОЗДІЛ 4 ВЗАЄМОДІЯ НТФ З РОЗПЛАВОМ І ВИЛИВКОМ ІЗ</b>	
<b>АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВА.....</b>	
4.1 Гранично–припустимі значення параметрів заливки розплавів .....	88
4.1.1 Взаємодія робочої порожнини НТФ з потоком розплаву.....	89
4.2 Передусадкове розширення і лінійна усадка виливків зі сплаву АК5М2 при литті в НТФ .....	99
4.3 Вплив технологічних параметрів НТФ на рідиноплинність розплаву АК5М2 .....	101
4.4 Вплив НТФ на якість поверхні і точність розмірів виливків зі сплаву АК5М2 .....	103
4.5 Вплив НТФ на мікроструктуру литого сплаву АК5М2.....	106
4.6 Результати випробування технології лиття в НТФ алюмінієвих сплавів в промислових умовах .....	113
4.7 Висновки .....	122
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>124</b>

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	127
ДОДАТКИ .....	139
ДОДАТОК А СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	140
ДОДАТОК Б АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ .....	143
ДОДАТОК В ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС.....	144

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- НТФ – низькотемпературна форма;
- НТС – низькотемпературна суміш;
- ХТС – холодно-твердіюча суміш;
- ЛГМ – процес лиття по газифікованим моделями;
- ПГФ – піщано-глиниста форма;
- ПГС – піщано-глиниста суміш;
- ПСС – пластифікована самотвердіюча суміш;
- РСС – рідка самотвердіюча суміш;
- ПАР – поверхнево-активна речовина;
- ЛВМ – лиття за витоплюваними моделям;
- ВПФ – вакуумно-пливке формування;
- $\sigma_{\text{СТ}}$  – межа міцності на стиск, Па;
- $\sigma_{\text{ВИГ}}$  – межа міцності на вигин, Па;
- $\sigma_{\text{Р}}$  – межа міцності на розрив, Па;
- $\sigma^{\circ}$  – залишкова міцність при стисненні форми і стрижня після заливки;
- $P$  – навантаження, Н;
- $F$  – площа, м<sup>2</sup>;
- $T$  – плинність формувальної суміші, %;
- $H_A$  – твердість зразка в тоці  $A$ ;
- $H_B$  – твердість зразка в точці  $B$ ;
- $\Gamma$  – газопроникність формувальної суміші, од.;
- $V$  – об'єм, м<sup>3</sup>;
- $H$  – висота, м;
- $p$  – тиск, Н/м<sup>2</sup>;
- $\tau$  – тривалість проходження через зразок повітря, с.

$O_c$  – обсіпальність формувальної суміші;

$m$  – маса, г;

$\Delta X'$  – масова частка вологи у формувальній суміші, %;

$\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  – висота суміші в гільзі, м;

$S$  – площа, м;

$V'$  – коефіцієнт варіації, %;

$\sigma$  – середнє квадратичне відхилення;

$\bar{x}$  – середнє арифметичне значення розподілу величини;

$\beta$  – коефіцієнт регресії;

$x$  – кількість матеріалу в складі (по масі), величина температури,

$\beta_i, \beta_j, \beta_{123}$  – коефіцієнти регресії;

$\xi_i, \xi_j, \xi_{123}$  – результати дослідів в точках симплексних решіток.

$\varepsilon_{л}$  – лінійна усадка виливка, %;

$l_{\phi}$  – лінійний розмір форми, м;

$l_{вил}$  – лінійний розмір виливка, м;

$\tau_{мін}$  – мінімально припустима тривалість заливки, с;

$\tau_{макс}$  – максимально припустима тривалість заповнення форми, с;

$\mu$  – коефіцієнт витрати ливникової системи;

$H_p$  – діючий напір, м;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$G_p$  – маса рідкого металу, кг;

$S_l$  – коефіцієнт тривалості заливання;

$\delta$  – переважна товщина стінки виливка, мм;

$M$  – гранично припустима маса розплаву, що пройшла через будь-який живильник, кг;

$M_p$  – рекомендована масова витрата розплаву, що пройшла через живильник при заливці НТФ, кг/с;

$M_A$  – максимальна припустима маса розплаву, що пройшла через живильник, на один погонний сантиметр ширини живильника, кг/(с·м);

$w$  – середня швидкість течії розплаву в живильнику, м/с;

$a$  – розмір сторони живильника, мм;

$R$  – радіус галтелі внутрішнього кута перетину живильника і стояка, мм;

$R_q$  – середньоквадратична шорсткість, мкм;

$R_a$  – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм;

$R_t$  – максимальна висота профілю, максимальна висота від піку до піку западини, мкм;

$R_v$  – максимальна глибина западини профілю, найглибша западина (глибина найбільш глибокої западини на профілі шорсткості на довжині оцінки поверхні – трасі), мкм;

$R_p$  – максимальна висота піку профілю, найбільш високий пік (висота найбільшого піку на профілі шорсткості на довжині оцінки поверхні – трасі), мкм;

$t_\phi$  – початкова температура форми, °С.

## ВСТУП

**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  $-78$  °С. 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'язана 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 безперервній динамічній взаємодії.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

1. *Вперше встановлено закономірності кінетики руйнування НТФ попередньо охолоджених до  $-15^{\circ}\text{C}$  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 глин, відповідно, Вільногірського, Просяновського 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 виливка і умов заливки на максимально-припустиму масу розплаву, що пройшла через один погонний сантиметр ширини живильника у межах 0,025...0,174 кг/(с·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 виливка, 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 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>016 Вільногірського родовища (Україна), 5±0,2% водопровідної води та 5±0,2% бентонітової глини марки

С2Т<sub>2</sub>та при температурі не вище  $-19...-20$  °С, що відповідає вимогам до формувальних сумішей і має наступний рівень властивостей:  $\sigma_{CT} = 1,0...1,1$  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-промислову перевірку в ДП «ІЦЛПТ» м. Одеса за якою встановлено, що використання розробленої суміші для НТФ та ливникової системи дозволило збільшити розмірну точність вилівка-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, проведено 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.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН ВИРОБНИЦТВА ВИЛИВКІВ ЗАГАЛЬНОМАШИНОБУДІВНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

#### 1.1 Сучасні формувальні та стрижневі суміші для виготовлення виливків загальномашинобудівного призначення

Для отримання виливків з алюмінієвих сплавів, в основному, використовують багаторазові (кокілі, прес-форми) або одноразові форми. У зв'язку з тим, що на сьогодні серійність виробів із алюмінієвих сплавів в Україні значно зменшилася, використання кокілю та прес-форм для алюмінієвих виливків стало економічнонедоцільним. При цьому в окремих випадках у разі використання кокілів застосовують спеціальні покриття для збільшення їх стійкості [101]. У випадку одиничного або малосерійного виробництва для виготовлення виливків використовують одноразові форми. Історично традиційним способом отримання литих виробів вважається спосіб заливки розплавленого металу в форми, що виготовлені на основі суміші кварцового піску з глиною та водою – ПГС. Різновидами виробництва форм з ПГС є формування «по-сирому» та формування «по-сухому». Сирі ПГС характеризуються [78...81,93...95,104...106]:

- низькою вартістю формувальних матеріалів;
- можливістю багаторазового використання оборотної суміші;
- високою продуктивністю формувального обладнання та технологічною гнучкістю.

Піщано-глинисті суміші, незважаючи на свої очевидні переваги, мають ряд суттєвих недоліків в числі яких:

- відносно невисока міцність, твердість і газопроникність виготовлених з них форм;
- необхідність підсушування суміші в області робочих порожнин форм;



- підвищена обсипальність, схильність до появи в виливках газових раковин, засмічень і ужимин;
- низька розмірна точність одержуваного лиття, яка обумовлена необхідністю розштовхування напівформ для проведення протягання моделей (при зніманні напівформи з підмодельної плити) і т.д.

З метою підвищення міцності і зменшення обсипальності в ПГС вводять гідроксохлорид алюмінію, сполучне на основі сополімерів і т.п. [1, 2], для підвищення міцності в сухому стані в ПГС додатково вводять лігносульфат [3], розчин бітуму в гасі [4], оптимізують параметри пресування [113] і т. п.

Проте, особливості транспортування, зберігання, використання та рівень токсикологічної та пожежної небезпеки пропонованих матеріалів-зміцнювачів ПГС навіть не дивлячись на підвищення міцності на стиск ПГС до 1,8...1,9 МПа і зниження обсипальності з 0,2 до 0,1% не привели до їх використання в ливарних цехах.

Виробництво форм «по-сухому» застосовують при серійному, дрібносерійному та одиничному виробництві відповідальних, важких виливків і тонкостінних виливків складної конфігурації. Такі форми мають більшу, порівняно з «сирими», міцність, газопроникність, піддатливість. Однак проведення сушіння форм, застосування більшої кількості матеріалів і збільшення часу охолодження виливків у формі, призводить до зростання вартості лиття, ускладнення обладнання, збільшення часу виробничого циклу.

Тобто, до недоліків лиття в ПГФ відносяться:

- невисока точність і якість поверхні виливків;
- відносно невисока міцність ПГС та механічні властивості виливків;
- складність і дорожняча механізації та автоматизації технологічних процесів виготовлення форм і отримання виливків;
- значні витрати висококваліфікованої і високооплачуваної ручної праці;
- використання великої кількості сипучих матеріалів;

- необхідність в значних виробничих площах;
- наявність поганих санітарно-гігієнічних умов праці робітників;
- для «сухих» ПГФ – значна енергоємність та тривалість виготовлення, що зумовлено необхідністю їх сушіння.

Прагнення до підвищення розмірної точності виливків, прискоренню процесу виготовлення лиття, стабілізації властивостей і підвищення міцності і газопроникності форм і стрижнів призвело до появи ряду технологій, які використовують в якості сполучної речовини рідке скло.

Рідке скло – метастабільна система  $m\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ , яка, як правило, в ливарних технологіях твердіє за допомогою речовин з кислотними хімічними властивостями, зокрема:

- газоподібним вуглекислим газом ( $\text{CO}_2$ -процес);
- рідкими речовинами (ацетатом етиленгліколю і т.п.);
- твердими речовинами, що містять оксид кальцію (ферохромовий шлак, скло і т.п.) і/або магнію (периклаз і т.п.).

Теплове затвердіння дозволяє отримувати рідкоскляні форми і стрижні (пісок + рідке скло) з відносно високим рівнем міцності, екологічної чистоти і санітарно-гігієнічних умов виробництва. Однак такі суміші мають велику тривалість і енерговитратність процесу сушіння, характеризуються гігроскопічністю, складністю видаленням форм і стрижнів з внутрішніх порожнин і піднутрень, отворів, внутрішніх кутів виливків, практично не піддаються регенерації і, відповідно, повторно не використовуються і т.п.

Для підвищення міцності форм і стрижнів в рідкоскляну суміш додатково вводять їдкий натр і прожарену каолінову глину, гідролізну смолу (побічний продукт від сірчаноокислого гідролізу лігнозмістові сировини), розчин полістиролу в толуолі [5...7], для поліпшення вибивання і збільшення міцності в якості додаткового компонента вводять відхід целюлозно-паперового виробництва [8, 9], для поліпшення вибивання та підвищення

газопроникності в суміш додатково вводять гранульоване деревне волокно, розпушений папір спільно з їдким натром [10, 11] і т.п.

Рідке скло затверділе хімічним способом – вуглекислим газом ( $\text{CO}_2$ -процес), рідким ацетатом етиленгліколю, ферохромовим шлаком і подібними речовинами, дозволяє отримувати форми і стрижні за більш короткий час, ніж в описаному вище способі затвердіння шляхом теплової сушки.

Виготовлення форм, стрижнів і виливків за  $\text{CO}_2$ -процесом супроводжується, в основному, виділенням в атмосферу водяної пари і невеликої кількості вуглекислого газу.

Використання  $\text{CO}_2$ -процесу дозволило у виробництві різко скоротити тривалість циклу зміцнення суміші, забезпечити високу живучість форм і високу універсальність технологічного процесу. Однак застосування цього типу сумішей призвело до значного (в 5...10 разів) збільшенню трудомісткості вибивання та збільшенню кількості дефектів типу засмічень і пригару на поверхні виливків внаслідок нестабільності процесу [12]. Крім того, наявність допоміжного обладнання для здійснення продування вуглекислим газом створили певні організаційні та технологічні труднощі при їх використанні у виробничому циклі. Слід зазначити, що такі суміші не позбавлені і ряду інших істотних недоліків в числі яких складність протягання моделі, обумовлена відсутністю усадки і крихкістю затверділої суміші, нестабільність її властивостей за обсягом і в часі, істотна обсіпальність, погане вибивання, енерговитратність регенерації.

Різні удосконалення  $\text{CO}_2$ -процесу з використанням попереднього короткочасного вакуумування і продувки теплим повітрям перед обробкою рідкоскляної суміші вуглекислим газом дозволяють за рахунок зменшення вмісту в суміші рідкого скла поліпшити її вибивання і плинність, знизити гігроскопічність, зменшити ймовірність появи газових дефектів і ужимин, підвищити розмірну точність виливків, але ускладнюють процес виготовлення форм та стрижнів, потребують використання додаткового

обладнання [13...15].

Рідкоскляні суміші, затверділі ацетатом етиленгліколю, володіють меншою міцністю, ніж термічно висушені суміші, і характеризуються рівнем вибивання від задовільного до поганого, практично, не регенеруються. Крім цього, ацетат етиленгліколю в рідкоскляній суміші є джерелом виділення з неї ацетону, оцтової кислоти, етиленгліколю, ацетальдегіду, формальдегіду, що істотно погіршує санітарно-гігієнічні умови виробництва.

Процес, де затвердіння рідкоскляних сумішей відбувається під впливом хімічного реагенту – двукальцієвого силікату ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) у вигляді ферохромового шлаку (ПСС-процес) більш технологічний, ніж  $\text{CO}_2$ -процес, внаслідок відсутності вуглекислотного обладнання.

Рідкоскляні суміші з ферохромовим шлаком характеризуються істотною обсіпальністю, поганим вибиванням, енерговитратністю регенерації, нестабільністю властивостей, яка зумовлена мінливістю складу ферохромового шлаку від партії до партії та зниженням в часі його хімічної активності. Крім цього, як і ацетат етиленгліколю, ферохромовий шлак є імпортомним матеріалом, що вимагає подрібнення до пилоподібного стану.

Подальшим етапом у розвитку рідкоскляних сумішей стали рідкі самотвердіючі суміші (РСС-процес). На відміну від звичайних сумішей на основі силікату натрію, РСС практично не вимагають ущільнення. Це досягається введенням до їх складу поверхнево-активних речовин (ПАР) які у складі РСС утворюють дрібні бульбашки піни, що забезпечує сумішам високу плинність. Для затвердіння одночасно з ПАР до складу РСС додають відповідні матеріали, які, тим не менш, зумовлюють високу міцність та погану вибиваємість таких форм.

Таким чином, основним недоліком рідкоскляних сумішей є висока залишкова міцність, що підвищує трудоемність або робить неможливим вибивання. Існуючі способи по поліпшенню вибиваємісті за рахунок застосування різних добавок органічного походження на сьогодні не дозволили у повній мірі вирішити цю проблему [84...86, 97, 98].

В основі способів виготовлення форм і стрижнів з залізо-, хромо- і алюмохромофосфатних ХТС є реакція взаємодії сполучної речовини з затверджувачем, як правило, залізовмісним матеріалом (трифолін, крокус, залізорудний концентрат, матеріали техногенного походження). Рідким компонентом в таких системах є ортофосфорна кислота ( $H_3PO_4$ ) або хромфосфатні, або алюмохромфосфатні сполучні речовини. Основними недоліками таких ХТС є їх висока вартість, крихкість і гігроскопічність, нестабільність властивостей, обумовлена нестабільністю хімічного складу застосовуваних залізооксидних матеріалів (вмістом  $Fe_2O_3$  в  $\alpha$ - і  $\gamma$ -модифікаціях, що мають різну хімічну активність).

З метою підвищення міцності і зниження обсипальності в такі ХТС в якості затверджувача використовують триетаноламін, амінний модифікатор, алюмохромофосфатне сполучне, модифіковане метілолсечовинами на стадії синтезу і т.д. Дані удосконалення дозволяють підвищити міцність сумішей до 4,0...5,5 МПа, істотно знизити рівень обсипальності форм і стрижнів, але не дозволяють знизити їх собівартість [16...18]. Крім цього, використовувані в фосфатних ХТС матеріали, в Україні не виробляють.

Значного підвищення якості лиття досягають при використанні ХТС на основі штучних імпорتنих смол [88, 89, 91]. Назви процесів і матеріали закордонного виробництва, що застосовують в Україні, для виготовлення одноразових форм і стрижнів на основі штучних смол [19] наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Назви процесів і матеріалів закордонного виробництва для виготовлення одноразових форм і стрижнів

Процес	Сполучний матеріал	Каталізатор затвердіння
Резол $CO_2$	фенолоформальдегідна смола	газоподібний $CO_2$
Cold-box amin	фенолоформальдегідна смола або поліізоціанат	суміш третинного аміну з сухим повітрям або

продовження табл. 1.1.

		газоподібним $\text{CO}_2$
Carbophen	фенольна смола, модифікована гідроокисю калію	газоподібний $\text{CO}_2$
Епокси- $\text{SO}_2$	суміш модифікованої епоксидної смоли з органічним пероксидом або акрилатом	суміш сухого повітря або азоту з газоподібним $\text{SO}_2$
AlphaSet	поліфенолятова смола	речовина на ефірній основі
Furan	фуранові смоли	речовина на основі мінеральних або сульфатних кислот або нагрів до $150\text{ }^\circ\text{C}$
Pepset	поліуретанові смоли	фенілпропілпіридин
Hot-box	карбамідо-формальдегідна смола	нагрів до $200\dots 240\text{ }^\circ\text{C}$

Загальний недолік використання смол штучного походження в процесі виготовлення форм і стрижнів, формування виливків, регенерації відпрацьованих сумішей і в наступні часи (після утилізації) – виділення значних кількостей фенолу, формальдегіду, фурфуролу, метанолу, ацетону, аміаку, стиролу і інших шкідливих і отруйних газоподібних речовин, що різко погіршує як санітарно-гігієнічні умови виробництва, так і загальну екологічну обстановку [19]. Так, наприклад, при виробництві стрижнів в оснащенні, що нагрівається, гази в своєму складі містять аміак, метанол, акролеїн, фенол, формальдегід, ціаністий водень та ін. При цьому для цеху продуктивністю 40...50 тис. т виливків в рік кількість викидів, що містять перераховані вище речовини, становить від 1 до 3 млн.  $\text{m}^3$  на добу [12, 20]. Важливо, що браковані форми і

стрижні, що містять цілий ряд високотоксичних речовин [21], вивозяться у відвали зазвичай без жодної переробки [22...24].

Зростаючі вимоги до точності одержуваних виробів та можливість одержувати більш складні виливки призвели до появи нових методів литва таких як, лиття по газифікованим моделях (ЛГМ), лиття за витоплюваними моделями (ЛВМ) і лиття у вакуумно-плівкову форму (ВПФ).

Лиття по газифікованим моделями з точки зору санітарно-гігієнічних умов виробництва і екологічної безпеки – один з найбільш «неблагополучних» способів лиття. Це пов'язано з деструкцією пінопласту під час заповнення форми розплавом, виділенням значної кількості газоподібного стиролу, бензолу, етилбензолу, толуолу та інших отруйних речовин [25]. Крім цього, заповнення таких форм розплавом сталі супроводжується його непередбачуваним і нерівномірним насиченням вуглецем (до 0,15%, за масою) [26, 27, 103]. Як результат, такі виливки з вуглецевої і низьколегованої сталі стають малопридатними для роботи не тільки в умовах динамічних і статичних навантажень, але і руйнуються (лопаються) вже в процесі їх термічної обробки. При виготовленні виливків з алюмінієвих сплавів для забезпечення газифікації пінопластової моделі в формі потрібне збільшення температури розплаву при заливці до 880...930 °С, що, практично, демодифікує використовуваний сплав та істотно знижує якість литих деталей.

Особливості технології ЛГМ також призводять до частих дефектів виливків, що зумовлено обвалом стінок форми і наявністю рідкої фази полістиролу на вільній поверхні розплаву у формі, але знижують вірогідність появи у виливках гарячих тріщин [108]. При цьому, безперервне вакуумування при заливанні форми з протипригарним покриттям не завжди виявляється ефективним для попередження виникнення таких дефектів виливків. З цих причин спосіб ЛГМ, як правило, застосовують тільки при виробництві виливків з чавуну, бронзи, латуні або сталевих виливків невідповідального

призначення першої групи складності відповідно класифікацією до ГОСТ 977-88.

Застосування при ЛГМ феромагнітного матеріалу, пов'язаного магнітним полем, дозволяє одержувати виливки з міцністними характеристиками, підвищеними на 20...30% та підвищити вихід годного за рахунок більш високої теплоакumuлюючої здатності матеріалу форми [28].

В цілому, при наявності можливості повної автоматизації процесу, зниженні трудомісткості операцій виготовлення суміші, вибивання і очищення виливків, повній регенерації формувального та стрижневого матеріалу, відсутності дефектів, пов'язаних зі складанням напівформ, ця технологія має ряд істотних недоліків: низьку міцність моделей, що обмежує мінімальну товщину стінки виливка; можливість коксування виливків; значне газовиділення при деструкції моделі [28, 29].

Останній фактор, незважаючи на порівняно невелику витрату полістиролу, вимагає обов'язкового термokatалітичного знешкодження відхідних газів і регенерації формувального матеріалу внаслідок накопичення в ньому продуктів деструкції при його багаторазовому використанні.

Лиття за виплавлюваними моделями – найдорожчий, найтриваліший і багатоетапний спосіб виробництва литва, що супроводжується не тільки викидами ряду шкідливих речовин і пилу, але і характеризується тривалістю виготовлення керамічних обolonкових форм, важкокерованістю якістю виливків, високим енергоспоживанням і значною складністю і проблемністю видалення залишків форми з виливків [30].

Вакуумно-плівкове формування (V-процес) отримало останнім часом досить широке поширення, завдяки своїй відносно низькій ціні, відсутності дефіцитних матеріалів і екологічної безпеки виробництва. Розміри виливків, які можуть бути виготовлені V-процесом, обмежуються тільки габаритними розмірами опок та продуктивністю застосовуваних вакуум-насосів, а складність конфігурації виливків, що виготовляються, обмежується



властивостями застосовуваних синтетичних плівок. Завдяки тому, що зусилля витяжки моделі при використанні V-процесу в 10 разів менше, ніж при формуванні в ПГС «по-сирому» і в 20 разів менше, ніж при застосуванні рідкоскляних сумішей, вдається використовувати моделі з кутами ливарних ухилів не більше 1%. При цьому відхилення точності виливків за масою, за даними [31], не перевищує 1%.

Використання даного методу дозволяє скоротити витрати формувальних матеріалів на 35...40%, зменшити трудомісткість операцій на всіх стадіях технологічного циклу, підвищити продуктивність праці в 2...5 разів, знизити брак лиття, викликаний засорами і тріщинами, скоротити капітальні витрати й експлуатаційні витрати, пов'язані з підготовкою та регенерацією піску [31].

Про те, маючи незаперечні переваги, метод V-процесу потребує вирішення низки питань, пов'язаних з підвищеною газовою пористістю і пригаром на виливках. Крім цього, до числа недоліків V-процесу можна так само віднести:

- підвищені вимоги до ливникової системи, яка повинна перешкоджати руйнуванню форми при заливанні і утворення поверхневих дефектів у вигляді наростів, заток та пригару[31];

- від початку і до кінця технологічного процесу використовується вакуум, що перешкоджає механізації праці;

- через те, що на заготовки з полімерних матеріалів накладають обмеження по тягучості і пластичності матеріалу, то це обмежує сферу застосування зазначеної технології;

- проблеми, що пов'язані з пилом і охолодженням формувальної суміші.

Таким чином, основними вимогами, які пред'являють до перспективних напрямків розвитку ливарного виробництва можна вважати:

- використання якісної нетоксичної сировини та ресурсозберігаючих малоенергоємних технологій;

- мінімізація долі людської праці в процесі виготовлення виливків та шкідливого впливу на людський організм;

- вторинна переробка використаних сировинних ресурсів;
- використання в технології матеріалів техногенного походження;
- низька собівартість продукції при її високій якості.

Таким чином, на сьогодні нема жодної технології, формувальної чи стрижневої суміші, яка б повністю відповідала вказаним вище вимогам. При цьому, найбільш гостро ця задача стоїть для виливків з кольорових сплавів з відносно невисокою міцністю та твердістю, наприклад, з алюмінієвих сплавів, що виготовляють в умовах одиничного або дрібносерійного виробництва.

## 1.2 Процеси формоутворення з використанням кріотехнологій

Перші відомості про застосування охолоджених ливарних форм відносяться до 30-х років ХХ століття. В 1934 р. А.А. Луньов запропонував спосіб виробництва виливків, при якому ПГФ охолоджувалася перед заливкою до температури  $-24...-25$  °С, що сприяло підвищенню щільності виливків [32]. Ці дослідження носили фрагментарний характер і не вийшли за рамки експериментів, але послужили основою для публікації низки винаходів.

Основною перешкодою для створення промислових технологій одержання виливків в НТФ була в той час відсутність досить продуктивного та безпечнообладнання для охолодження ливарних форм [96, 107]. Тому такі технології, за задумкою розробників, були спрямовані, в основному, на використання природного холоду і орієнтовані, відповідно, для районів з холодними кліматичними умовами.

В СРСР системні досліджень, які спрямовані на вивчення процесів виготовлення і заливки НТФ та створення технології одержання бездефектних виливків, почалися з 70-х рр. ХХ ст. на Уралвагонзаводі [30].

За кордоном одночасно з дослідженнями в СРСР також проводили розробки НТФ. На сьогодні, завдяки розвитку кріотехніки за кордоном стало можливим виготовляти виливки з алюмінієвих сплавів масою до 136 кг [33] та виробляти НТФ з розмірами  $1000 \times 1000 \times 250$  мм [34].

Автори робіт [35...37 та ін.] розглядають питання виготовлення піщаних форм за крижаними моделями без сполучного матеріалу в піску, з використанням в складі крижаної моделі розчинених або емульгованих технологічних добавок, в тому числі, сполучного матеріалу, з використанням вакууму і упаковки крижаної моделі в синтетичну плівку і т.п. Проте, на сьогоднішній день всі способи лиття по крижаних моделях носять чисто гіпотетичний характер і промислового значення не мають.

Спосіб виготовлення керамічних форм і стрижнів заморожуванням, розроблений Глебовим С.М., включає наступні технологічні операції:

- приготування водної в'язкої суспензії;
- заповнення суспензією формотворного оснащення;
- заморожування суспензії, витяг замороженого напівфабрикату, його сушіння і випалення, складання форм і стрижнів перед заливкою.

За даними автора розробки, ця технологія дозволяє виготовляти виливки з чавуну, вуглецевих і легованих сталей, кольорових сплавів, забезпечуючи їм розмірну точність 4...7 класу по ГОСТ 26645-85 і шорсткість литий поверхні від Ra 1,6 до Ra 3,2 [38].

По суті, спосіб Глебова С.М. – це не спосіб виготовлення керамічних форм і стрижнів заморожуванням, а спосіб затвердіння кремнезольової суспензії заморожуванням, оскільки наступні технологічні операції підготовки форми до заливки ідентичні операціям дорогого, тривалого і енерговитратного способу лиття за виплавленими моделями.

Використовувати воду як сполучний матеріал для виготовлення ливарних форм у 1941 році запропонував В.С. Бондаревський [39]. З того часу заморожені форми вивчали в СРСР, Англії, Японії та Польщі [40...43].

Найбільш вагомий внесок у розвиток теорії і технологію лиття сталі в заморожені форми вніс Грузман В.М.

У своїх роботах Грузман В.М. [44...49]:

- розробив методи визначення реологічних, деформаційних і теплофізичних властивостей НТФ, визначив їх механічні і теплофізичні властивості фільтраційні характеристики;

- розробив реологічну модель НТФ, математичну модель теплової взаємодії модельного оснащення зі стінкою НТФ;

- показав неможливість підвищення швидкості затвердіння виливків в НТФ;

- визначив умови руйнування поверхні НТФ потоком розплаву сталі і тепловим випромінюванням з його вільної поверхні.

Дослідження Замятіна М.І. [50] присвячені питанню формування протипригарних покриттів на заморожених стрижнях. За результатами досліджень М.І. Замятіним розроблено склади технологічних протипригарних фарб для НТФ і стрижнів, визначені фізико-механічні та технологічні властивості цих фарб, встановлено вплив складу протипригарного покриття на ужиміностійкість стрижнів, досліджені закономірності теплопереносу в системі «рідкий метал – протипригарне покриття – заморожена форма (стрижень)», розроблена фізична модель досліджуваного процесу, запропонована методика математичного розрахунку теплопереносу в системі «рідкий метал – протипригарне покриття – заморожена форма (стрижень)» на основі клітинних автоматів.

Незважаючи на всі раніше отримані результати на сьогоднішній день відсутні дані про ряд властивостей НТФ, її взаємодії з розплавами легкоплавких сплавів, зокрема, сплавів на основі алюмінію. Тобто, в числі таких відсутніх даних і невирішених завдань:

- оптимізація складу суміші НТФ з матеріалів українського походження;

- визначення гранично-припустимої витримки НТФ на повітрі до заливки;

- кінетика обсіпальності НТФ в процесі її витримки на повітрі та динамічного впливу;

- вплив складу суміші НТФ і її температури на ливарні властивості алюмінієвого сплаву;

- вплив НТФ на структуру виливків з алюмінієвого сплаву;
- вплив параметрів заливки і конструкції ливникової системи на руйнування поверхні НТФ потоком розплаву і т.п.

### 1.3 Сучасні способи виробництва низькотемпературних форм

Методи виробництва НТФ, по відношенню до використання модельної оснастки, можна розділити на дві групи. До першої групи відносять способи, які передбачають заморожування полуформи після зняття її з моделі, що схематично надано на рис. 1.1.

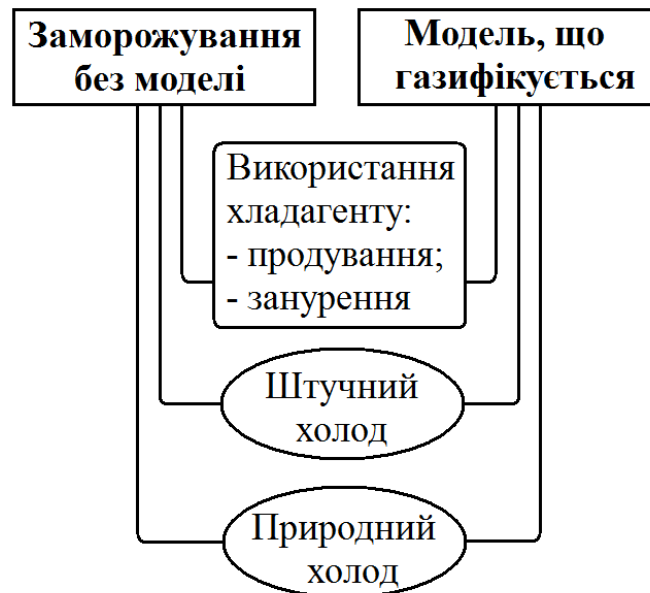


Рисунок 1.1 – Класифікація способів отримання НТФ, що передбачають заморожування полуформи після зняття її з моделі

До другої групи належать способи при яких заморожування форми відбувається без зняття її моделі, що схематично представлено на рис. 1.2.

Основним недоліком способів першої групи є необхідність використання сумішей з сирої міцністю, достатньою для бездефектного зняття форми з моделі. Надати необхідну міцність такій формувальній

суміші, можливо, шляхом додавання в неї певної кількості сполучного, наприклад, глини. Однак ця операція де що погіршує умови праці при виробництві сумішей і транспортуванні вибитого піску.

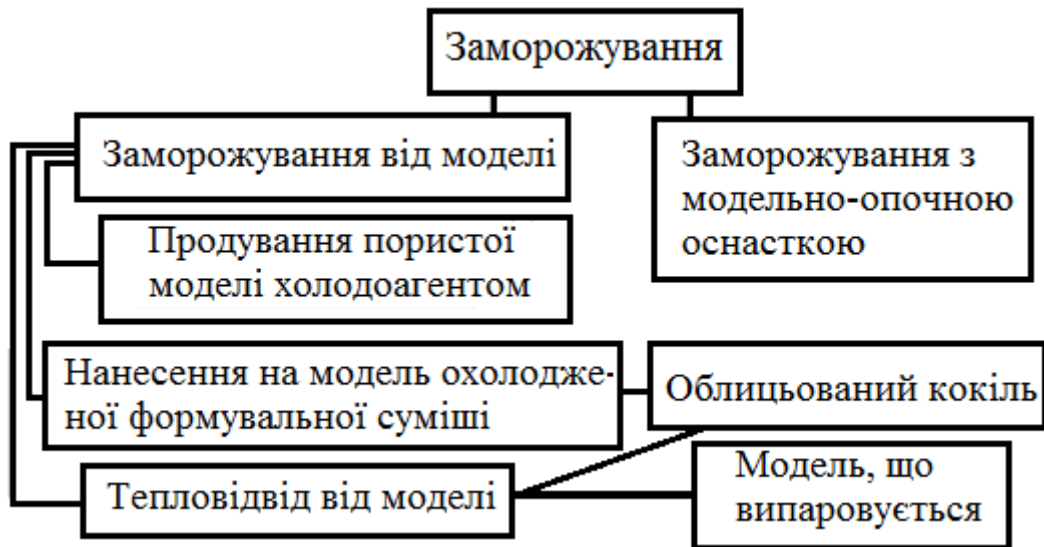


Рисунок 1.2 – Класифікація способів отримання НТФ, що передбачають заморожування полуформи без зняття її з моделі

Способи, що відносяться до другої групи, отримують останнім часом досить широке поширення в Росії, Японії, ФРН, Польщі та інших країнах, де приділяють особливу увагу розробці технології отримання виливків в НТФ.

Охолодження суміші методами, що належать до другої групи, здійснюється через модельну оснастку. Така оснастка може бути, як металевою, так і неметалевою. У той же час, у залежності від габаритів форми можуть бути використані просто охолоджені моделі, моделі з порожнинами, що омиваються холодоагентами, або пористі моделі, через пори яких холодоагент подається безпосередньо у форму.

Одночасно з постійними і полупостійними моделями при литті в НТФ використовують також такі, що газифікуються і легко випаровуються.

Моделі, що легко випаровуються, по своїм технологічним параметрам відносяться до видалених, так як видалення моделі відбувається до заливки, але на відміну від традиційних вимагають значно менше енерговитрат. Сьогодні відомі способи отримання низькотемпературних моделей, які легко випаровуються, що виготовляють з ущільненого снігу, льоду, покритого криогідратним шаром тонкодисперсного хлористого заліза, з гранул пінополістиролу, укладених в заморожену оболонку з замерзлих рідин (води, поліетиленгліколю, парафіну), а також із сухого льоду. Видалення таких моделей не представляє труднощів і може відбуватися за рахунок теплоти навколишньої суміші або з використанням вакууму. Вочевидь, що ці моделі можна вважати найбільш перспективними для НТФ, так якіх застосовують для виготовлення нероз'ємних форм, вони не вимагають великих енергетичних витрат на видалення і для них використовують недорогі та недефіцитні матеріали.

Використання моделі, що газифікується, так само дозволяє застосовувати нероз'ємну форму. Причому краще використовувати пористу модель для забезпечення швидкого охолодження форми подачею холодоагенту через пори моделі. Однак застосування пінополістиролових моделей, що газифікуються, не дозволяє повною мірою використовувати переваги способу НТФ – такі як висока екологічна чистота і відсутність дорогих, дефіцитних матеріалів.

Одним із прикладів застосування заморожених формувальних сумішей, також може служити їх використання в якості облицювання кокілів.

Схема отримання виливків в такому випадку наступна:

– кокіль і модель охолоджують до  $-30\dots-40$  °С та збирають відповідно до схеми, яка приведена на рис. 1.3, а,

– у зазор величиною 10...20 мм між кокілем і моделлю надувають пісок, що містить глину, з вмістом води 3...5% за масою (див. рис. 1.3, б) [51].

Температура піску у такому випадку повинна бути не більше 20 °С, при цьому в робочу порожнину кокілю бажано надувати пісок з пониженою температурою.

Після промерзання піску в зазорі, облицьований кокіль знімають з моделі (див. рис. 1.3, в). Для того, щоб з'їм відбувався легко, без руйнування облицьовального шару, поверхню моделі ретельно очищують від конденсату, що спрощується при використанні моделей, виготовлених з матеріалів з низькою теплоакумулюючої здатністю.

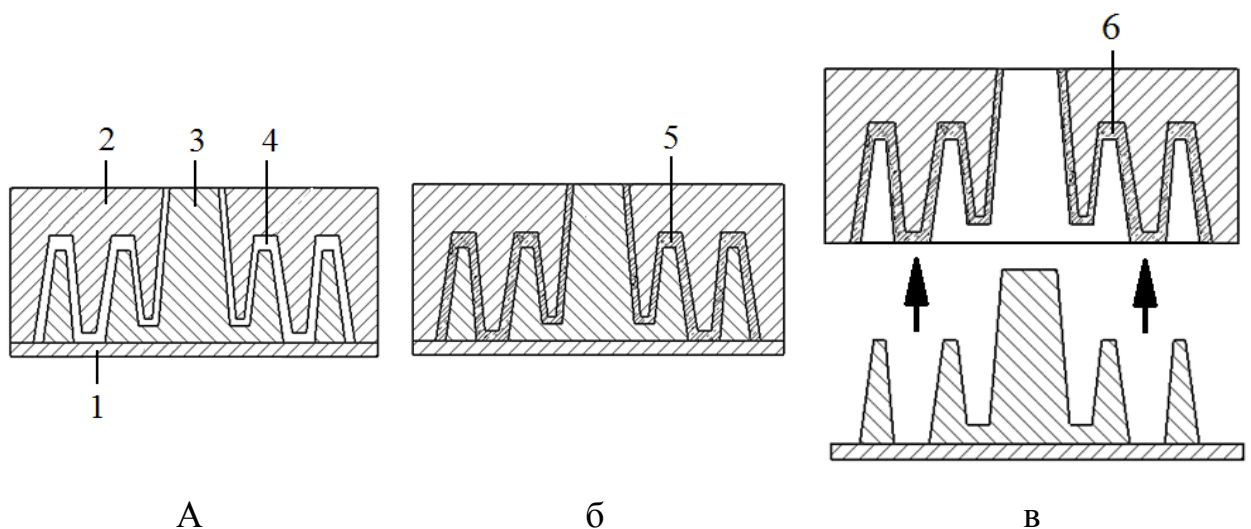


Рисунок 1.3 – Використання замороженої суміші для облицьовання кокілю:  
 а – охолоджені кокіль та модель; б – надув охолодженої формувальної суміші в зазор; в – зняття облицьованого кокілю з підмодельної плити:

1 – підмодельна плита; 2 – кокіль; 3 – модель; 4 – зазор;

5 – суміш; 6 – заморожена суміш

Час, протягом якого заморожена оболонка на облицьованому кокілі може зберігати від'ємну температуру, залежить від таких факторів, як температура навколишнього середовища, співвідношення маси і облицьованої поверхні кокілю та ін. Так, наприклад, маса алюмінієвого кокілю, що володіє підвищеною теплоємністю, повинна перевищувати масу



облицювання в 3...4 рази. Вважають, що, керуючись цими параметрами, можна забезпечити живучість облицьованого шару протягом 30...90 хв.

Використання заморожених формувальних сумішей з різними наповнювачами, дозволяє усунути багато недоліків при виробництві виливків методом точного лиття. Слід зазначити, що заміна традиційних матеріалів, застосовуваних при ЛВМ, на нетоксичні і дешеві, дозволяє найповніше реалізувати переваги даної технології: зменшити вартість виробництва за рахунок зниження кількості і вартості компонентів, знизити загальні енерговитрати, спростити і підвищити практично до 100% регенерируемість і одержувати виливки підвищеної точності і складності.

Одним з варіантів отримання виливків у формах із невиділяючими моделями, є технологія лиття по моделях, що газифікуються в магнітному полі в формах сипучих феромагнітних матеріалів. В якості формувальних матеріалів для магнітних форм застосовують сипучі феромагнітні матеріали, що випускаються промисловістю: дріб сталеву колотою і литу (ДСК і ДСЛ), чавунну колотою і литу (ДЧК і ДЧЛ) згідно ГОСТ 11964-83.

Метод отримання виливків у магнітному полі у формах із сипучих феромагнітних матеріалів має ряд переваг. До них слід віднести: можливість отримання виливків з високою геометричною точністю, поліпшення якості поверхні і структури металу у виливках, зменшення їх ваги.

Однак, застосування немагнітної моделі, призводить до нерівномірного розподілу напруженості магнітного поля по об'єму форми. Особливо різко виражено це явище на межі «металева дріб – поверхня моделі». Нерівномірність поля на цій ділянці зростає стрибкоподібно, збільшуючись до центру моделі. При заливанні рідкого металу, у формі утворюється газовий зазор між дзеркалом металу і переднім фронтом моделі. Наявність зазору звільняє частинки дробу в прикордонній до моделі області від зв'язку між собою. В результаті цього незв'язані частинки шикуються в пасма по силовим лініям магнітного поля і відбувається заростання порожнини форми

з боку поверхонь, перпендикулярних магнітним силовим лініям. При великих значеннях індукції магнітного поля частинки впроваджуються в поверхневі шари виливка, що призводить до її браку. Відомі методи запобігання цього явища не сприяють повному усуненню заростання порожнини газового зазору частинками феромагнітного формувального матеріалу.

Застосування низькотемпературних видаляємих моделей при магнітному формуванні, дозволяє відмовитися від газифікованих моделей [28]. Спосіб полягає в тому, що заморожену модель з нанесеним на неї охолоджуючим криогидратним шаром поміщають в опоку. Після чого в неї засипають на 3/4 об'єму охолоджену до 5...10 °С феромагнітну суміш. Суміш попередньо ущільнюють, незаповнений об'єм опоки засипають нагріту до 150...200 °С оборотну суміш і після ущільнення сумішей в соленоїдні котушки подають електричний струм. Виникає електромагнітне поле, що зміцнює форму. Тепло від суміші передається через суміш до моделі і вона починає плавитися. Вода через пори суміші надходить у водозбірник. Після сушіння форми в неї заливають розплавлений метал і, коли виливок кристалізується, електромагнітне поле відключають.

Суттєвим недоліком такого способу є його чутливість до ряду температурних та часових факторів формування та геометричних факторів моделі, що ускладнює технологію та знижує якість виливків.

#### 1.4 Вимоги до сучасних формувальних і стрижневих сумішей

Різноманітність застосовуваних технологічних схем і матеріалів для виготовлення форм, стрижнів і виливків, використовуваного обладнання, умов виробництва і т.п. визначили наступні загальні вимоги до сучасних формувальних і стрижневих сумішей [52].

Матеріали ливарної форми і стрижня повинні бути хімічно інертні по відношенню до матеріалу виливка, мати певну термічну стійкість і вогнетривкість.

*Міцність* (мінімальна вихідна) і *твердість* (твердість – непрямий

показник міцності) форми і стрижня до заливки повинні бути такими, щоб в прийнятих умовах виробництва забезпечити отримання, транспортування, зберігання, складання форм і стрижнів без їх ушкоджень або руйнування, а виливків без тріщин і викривлення, тобто мати відповідну живучість під дією певного динамічного впливу.

*Залишкова* (максимальна) *міцність* при стисненні ( $\sigma^0$ ) форми і стрижня після заливки повинна бути такою, щоб забезпечити найменші витрати при їх вибиванні з вилівка і при цьому не пошкодити (деформувати, зруйнувати) виливок. За результатами експертного опитування і чисто суб'єктивної оцінки фахівців-ливарників, які працюють в ливарних цехах з виробництва сталевого, чавунного, бронзового і алюмінієвого лиття, прийнято вважати, що суміш вибивається:

- погано – при  $\sigma^0 \geq 2,2 \dots 3,0$  МПа,
- задовільно – при  $\sigma^0 = 1,2 \dots 2,5$  МПа,
- добре – при  $\sigma^0 = 0,2 \dots 1,5$  МПа,
- відмінно – при  $\sigma^0 = 0,0 \dots 0,3$  МПа,

де нижня межа – переважно виливки з легкоплавких кольорових сплавів, верхня – переважно виливки з чавуну і сталі.

Тобто, вибивання суміші тим вище, чим нижче її залишкова міцність.

У формувальних і стрижневих сумішей величини вихідної і залишкової міцності залежить від значного числа факторів в числі яких: властивості і природа використаного сполучного і вогнетривкого матеріалу, фракційний склад застосовуваного вогнетривкого матеріалу, спосіб, режим і умови затвердіння суміші, вміст сполучної речовини в суміші, хімічна активність сполучного матеріалу і каталізатора затвердіння, тривалість впливу речовини-каталізатора при хімічному способі затвердіння суміші і т.д. На відміну від вихідної міцності, величина залишкової міцності суміші ще залежить і від величини самої вихідної міцності, температури і тривалості її впливу на суміш і т.п.

Наприклад, витримка форм і стрижнів на повітрі до заливки у ПГС і ХТС призводить до підвищення їх початкової міцності за рахунок, відповідно, випаровування води і підвищення ступеня полімеризації смоли. У заморожених форм і стрижнів така витримка призводить до зниження початкової міцності за рахунок підвищення їх температури. У той же час, після заливки форми міцність ПГС кілька збільшується, в основному, за рахунок зневоднення і часткової шамотизації бентонітової глини в шарах форми і стрижня, які контактували з розплавом.

На відміну від ПГС, аналогічні поверхневі шари у ХТС втрачають міцність в результаті вигорання і коксування полімеризованої смоли, зберігаючи при цьому вихідну міцність в глибинних шарах суміші. У той же час, нагрів форм і стрижнів теплотою вилівка, що формується, при заморожених сумішах призводить до повного розплавлення льоду – їх сполучного матеріалу. Як результат заморожена суміш НТФ повністю втрачає міцність і при вибиванні пісок під власною вагою висипається з усіх порожнин вилівка.

*Крихкість* – це показник деформаційної здатності матеріалу форми або стрижня під навантаженням яку вони відчують, наприклад, при протягуванні моделей або витягу стрижня з стрижневого ящика. Крихкість оцінюють величиною співвідношення  $X_r = \sigma_{CT} / \sigma_p$ . Чим нижче величина  $X_r$ , тим менше крихкість суміші. Для ПГС і ХТС, наприклад, величина показника  $X_r$  знижується в міру їх, відповідно, висихання і затвердіння. Тобто, в процесі витримки до заливки міцність і крихкість таких сумішей зростають.

*Пластичність* – показник-антонім крихкості, характеризує здатність суміші деформуватися під впливом зовнішнього навантаження без порушення цілісності і зберігати отриману форму після зняття навантаження.

*Обсипальність* є показником схильності форми і стрижня до руйнування їх поверхневого шару при стиранні і в певній мірі до появи в литві засмічень.

Традиційно прийнято вважати, що при високій якості форм і стрижнів обсипальність циліндричного зразка при стиранні протягом 1 хв не перевищує 0,1...0,2 % його маси. Підвищена обсипальність свідчить про те, що форма або стрижень виготовлені із суміші, яка частково втратила живучість, або для їх виготовлення використані некондиційні вихідні матеріали, або порушений елементарний склад суміші.

*Живучість* – це тривалість зберігання готової суміші у відповідних умовах протягом часу за яким виготовлені форми і стрижні по міцності і твердості, відповідають аналогічним показникам форм і стрижнів, виготовленим з свіжоприготованої суміші. У ливарних цехах період живучості суміші оцінюють часом, за який з моменту приготування суміші дані показники знижуються не більше ніж на 15...30%.

*Довговічність* – здатність суміші зберігати або змінювати несуттєво свої властивості і склад після повторних заливок металу в неї. Показник для оцінки числа можливих повторних використань суміші без її регенерації.

*Плинність* – це показник, який характеризує здатність суміші під впливом зовнішніх навантажень переміщатися в обмеженому просторі з більш ущільнених областей в менш ущільнені. Для визначення кількісного значення величини плинності ПГС використовують метод Орлова. Для непрямой оцінки плинності використовують величину міцності суміші на стиск у вологому стані ( $\sigma_{ст}^{вл}$ ) відповідно до чого суміші загалом прийнято розділяти на:

- сипучі ( $\sigma_{ст}^{вл} \leq 0,007$  МПа), ущільнюються під дією вібрації;
- пластичні ( $\sigma_{ст}^{вл} > 0,007$  МПа), ущільнюються під дією струшування або/і пресування.

*Ущільнення* – здатність суміші підвищувати об'ємну масу (збільшувати гадану щільність) при заданій роботі ущільнення або здатність суміші до формування міцності в результаті ущільнення. Даний

показник, як правило, використовують для характеристики ПГС для яких він прямо пропорційно і лінійно залежить від їх вологості.

*Рухливість* – показник здатності суміші самопливом (під дією гравітації) заповнювати порожнини на поверхні (відтворювати рельєф) моделі. Застосовують для оцінки плинності рідкої самотвердіючої суміші (РСС).

*Формуємість*(сипкість) – показник здатності суміші ущільнюватися в процесі заповнення форми шляхом вільної засипки суміші.

*Газопроникність* – газодинамічна властивість суміші, що характеризує її здатність в структурованому (ущільненому, затверділому) стані пропускати через себе газові потоки (повітря, пари води; продукти розкладання сполучної речовини і т.п.).

*Газотвірність* (газотвірна здатність) – газодинамічна властивість суміші, що характеризує її здатність виділяти гази і пари при нагріванні.

*Вологість* – вміст води, яка в суміші може бути як самостійним компонентом, так і входити до складу одного і більше компонентів цієї суміші.

*Гігроскопічність* – здатність суміші поглинати вологу з повітря (при зберіганні суміші, форми, стрижня).

*Трищиностійкість* (термостійкість) – здатність виробу із структурованої суміші не руйнуватися при односторонньому швидкому нагріванні

*Піддатливість* – здатність структурованої суміші деформуватися, ущільнюватися або руйнуватися під дією зовнішнього навантаження. Недостатня піддатливість – одна з причин, що призводить до появи в виливках гарячих і холодних тріщин.

З числа описаних вище властивостей формувальних і стрижневих сумішей за результатами аналізу щодо застосування НТФ для виробництва литва з алюмінієвих сплавів відібрали найбільш значущі.

Приблизні величини відібраних параметрів для одноразових форм і стрижнів (за даними робіт [38...40]) наведені в табл. 1.2

Таблиця 1.2 – Зразкові реальні і бажані для НТФ межі зміни величини основних показників матеріалів одноразових форм і стрижнів з ПГС, ХТС і РСС

Параметр	Межі зміни параметрів	
	реальні	бажані
1	2	3
$\sigma_{ст}$ , МПа	0,06...4,20	2...3
Твердість, од	70...90	не менше 70
Обсипальність, % (за масою)	0,01...0,50	не більше 0,2
Живучість, год	0,1...2,5	не менше 0,1
Газопроникність, од	80...380	не менше 90

### 1.5 Мета та задачі досліджень

Метою роботи є розробка наукових та технологічних основ виготовлення НТФ для литва загальномашинобудівного призначення із алюмінієвих сплавів для поліпшенні якості виливків та зниження їх собівартості за рахунок скорочення трудомісткості операцій формоутворення, вибивання форм і стрижнів, поліпшенням екологічних умов праці на виробництві та навколишньої середи.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

1. Дослідити вплив складу, дисперсності і температури охолодження формувальних матеріалів, способу підготування складових НТС на фізико-технологічні властивості НТФ. Оптимізувати склад НТС.
2. Дослідити кінетику руйнування НТФ на повітрі під дією динамічного впливу та розробити опис етапів механізму такого руйнування.
3. Дослідити вплив НТФ на рідиноплинність, лінійну усадку, передусадкове розширення виливків з алюмінієвого сплаву.
4. Дослідити вплив НТФ на мікроструктуру сплаву АК5М2.
5. Дослідити механізм та виявити закономірність впливу параметрів

залиття виливків на руйнування поверхні форми потоком розплаву.

6. Випробувати розроблену технологію виробництва НТФ у промислових умовах та оцінити якість вироблених виливків, впровадити наукові та технологічні розробки у навчальний процес.

## 1.6 Висновки

1. Проведений аналіз і узагальнення літературних даних показав, що практично всі традиційні методи отримання виливків у разових формах не відповідають сучасним екологічним вимогам. При цьому, як правило, використовуються дорогі і дефіцитні матеріали, а висока вартість регенерації не дозволяє використовувати більш 30...50% зворотних шихтових матеріалів.

2. На сьогодні, відносно НТФ відсутні відомості щодо впливу складу, дисперсності і температури охолодження формувальних матеріалів на фізико-технологічні властивості НТФ; не встановлено механізм та закономірність впливу параметрів залиття виливків на руйнування поверхні форми потоком розплаву; не виявлено впливу складу НТФ на рідиноплинність, лінійну усадку, передусадкове розширення виливків з алюмінієвого сплаву; відсутні дані про технологічні межі використання НТФ; не досліджено вплив швидкості кристалізації та охолодження виливків із алюмінієвого сплаву на їх структуру; не встановлена вірогідність виникнення ужимин на виливках зі алюмінієвого сплаву при литті в НТФ.

3. На підставі результатів проведеного аналізу сформульована мета і поставлені задачі досліджень.



## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В роботі були використані наступні матеріали:

- пісок кварцовий марки 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>016 (Вільногірське родовище, Україна, ГОСТ 2138-91);
- бентонітова глина марки С2Т<sub>2</sub> (Дашуковське родовище, Україна, ГОСТ 3226-93);
- глина каолінова марки С2Т<sub>2</sub> (Просяновське родовище, Україна, ГОСТ 3226-93);
- вода водопровідна (сира, кип'ячена);
- вода сильно газована марка «Моршинська» (ТУ У 15.9-00382651-003:2002).

#### 2.1 Технологічна схема виготовлення НТС та НТФ

Для виготовлення НТС були використані наступні формувальні матеріали: пісок кварцовий, вода, бентонітова та каолінова глина.

Виготовлення НТС проводили в лабораторних бігунах. При цьому в бігунах суміш готували наступним чином:

- вмикали бігуни та вводили в них пісок і глину, перемішували протягом 3...5 хв;
- додавали в бігуни 5% води і суміш перемішували ще 2...3 хв.

Процес виготовлення НТФ відбувався в наступній послідовності:

- на модельну плиту з моделлю встановлювали опоку і засипали її формувальною сумішшю, після чого проводили ручну трамбовку;
- модель з опокою ставили в морозильну камеру на 20...24 год;
- після цього отримані полу форми збирали та заливали, отримані зразка досліджували.

Температуру вимірювали безконтактним інфрачервоним термометром-пірометром мод. AR360A, а також спиртовим термометром мод. ТТЖ-М. Для

зважування компонентів формувальної суміші і зразків використовували ваги лабораторні марки SF-400-D-3 (0,1...3,0 кг). Розмірні вимірювання проводилися штангенциркулем мод. МІОЛ 15-220 з похибкою 0,1 мм.

## 2.2 Визначення міцності на стиск

Визначення міцності на стиск формувальної суміші з початковою додатною та від'ємною температурою проводили за ГОСТ 23409.7-78. Для випробувань застосовували універсальний прилад для визначення міцності формувальної суміші мод. 04416.

Межу міцності на стиск суміші визначали за формулою:

$$\sigma_{ст} = \frac{P}{F}, \quad (2.1)$$

де  $P$  – найбільше навантаження, встановлене при випробуванні зразка, МН;  
 $F$  – площа поперечного перерізу,  $\text{м}^2$ .

## 2.3 Визначення плинності формувальної суміші

Плинність формувальної суміші визначали за ГОСТ 237409.17-78.

Для цього вметалеву нероз'ємну гільзу насипали формувальну суміш та за допомогою лабораторного копра мод.5033а ущільнювали триразовим ударом вантажу. Після цього гільзу повертали на виштовхувач і твердоміром мод. 04412А вимірювали твердість зразка в точці А. Потім зразок піднімали на виштовхувач на висоту вкладиша, вкладиш видаляли і вимірювали твердість в точці В, що схематично надано на рис. 2.2.

Випробування проводили на трьох зразках.

Плинність ( $T$ ) у відсотках розраховували за формулою:

$$T = \frac{H_A \cdot 100}{H_B}, \quad (2.2)$$

де  $H_A$  – твердість зразка в точці  $A$ ;

$H_B$  – твердість зразка в точці  $B$ .

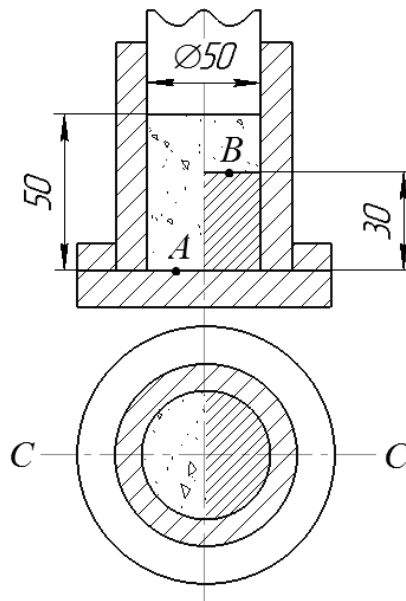


Рисунок 2.1 – Схема для визначення плинності формувальної суміші

#### 2.4 Визначення газопроникності формувальної суміші

Газопроникність замороженої формувальної суміші визначали за ГОСТ 23409.6-78 на приладі мод. 04315. Газопроникність визначали прямим методом пропускання повітря кімнатної температури через стандартний циліндричний зразок випробуваної суміші. Значення газопроникності ( $\Gamma$ ) розраховували за формулою:

$$\Gamma = \frac{Vh}{Fp\tau}, \quad (2.3)$$

де  $V$  – об'єм повітря, що пройшло через зразок, м<sup>3</sup>;

$h$  – висота зразка, м;

$F$  – площа поперечного перерізу зразка, м<sup>2</sup>;

$p$  – тиск повітря перед зразком, Н/м<sup>2</sup>;

$\tau$  – тривалість проходження через зразок повітря, с.

Час проходження через зразок повітря фіксували секундоміром з точністю 0,1 с.

## 2.5 Визначення обсипальності формувальної суміші

Обсипальність характеризують величиною втрати ваги поверхневого шару зразка в одиницю часу при терті його об стінки сітчастого барабана, що обертається з частотою 60 об/хв. Для випробувань зразок виготовляли в циліндричній гільзі, ущільнюючи його трьома ударами копра мод. 5033а з послідовним заморожуванням.

Дослідження проводили на приладі для визначення обсипальності (мод. 056) Усманського заводу. Спочатку зразок зважували на лабораторних вагах мод. SF-400S (0,01...0,5 кг), потім встановлювали в центральну частину барабану і вмикали прилад. Випробування на приладі проводили протягом часу встановлення зразка в барабан і до повного його руйнування, щохвилино фіксуючи масу суміші, що висипалася з барабану.

Обсипальність ( $O_c$ ) у відсотках розраховували за формулою:

$$O_c = \frac{m - m_1}{m} 100, \quad (2.4)$$

де  $m$  – маса зразка до випробування, г;

$m_1$  – маса зразка після випробування через 1 хвилину, г.

Для будови кінетичної кривої руйнування зразка під дією динамічного

впливу використовували формулу (2.4).

## 2.6 Визначення вологості замороженої формувальної суміші

Визначення вологості замороженої формувальної суміші проводили за ГОСТ 23409.5-78. Для досліджень використовували зразок 200x200x200 мм ущільненої вручну суміші з масовою часткою води та глини по 5% кожного. Такий зразок для заморожування ставили у камеру з початковою температурою +20, 0 і –20 °С. Зразки охолоджували до –20 °С з ізотермічною витримкою в продовж 48 годин. Після цього від зразків відбирали відповідно до схеми на рис 2.2) з глибини 1, 3, 7, 12 і 16 мм від поверхні і визначали їх вологість.

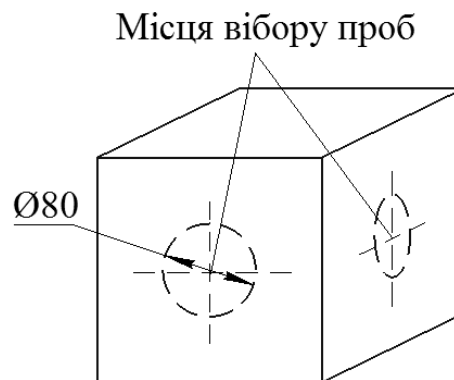


Рисунок 2.2 – Схема відбору проби для визначення вологості НТФ

Масову частку втраченої води ( $\Delta X'$ ) у відсотках розраховували за формулою:

$$\Delta X' = 20 \cdot (5 - x), \quad (2.5)$$

де  $x$  – масова частка води у зразку після заморожування, %.

## 2.7 Визначення щільності формувальної суміші

Щільність суміші визначали за ГОСТ 23409.13-78, насипну щільність ( $\rho$ ) розраховували за формулою:

$$\rho = \frac{m_2}{V_1}, \quad (2.6)$$

$$V_1 = H \cdot S, \quad (2.7)$$

де  $m_2$  – маса суміші, кг;

$V_1$  – об'єм, займаний сумішшю в гільзі, м<sup>3</sup>;

$H$  – висота суміші в гільзі, м;

$S$  – площа підстави суміші в гільзі, м<sup>2</sup>.

## 2.8 Статистична обробка експериментальних даних

Постановку експериментів і статистичну обробку даних здійснювали за методиками робіт [53...57]. Для визначення помилки експерименту розраховували мінімально припустиму кількість повторень кожного досліду, використовуючи коефіцієнт варіації, задану величину відносної помилки (довірчу ймовірність) і номограму на рис. 2.3 [58].

Коефіцієнт варіації ( $V'$ ,%) розраховували за формулою:

$$V' = 100 \cdot \sigma \cdot \bar{x}^{-1}, \quad (2.8)$$

де  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення;

$\bar{x}$  – середнє арифметичне значення розподілу величини.

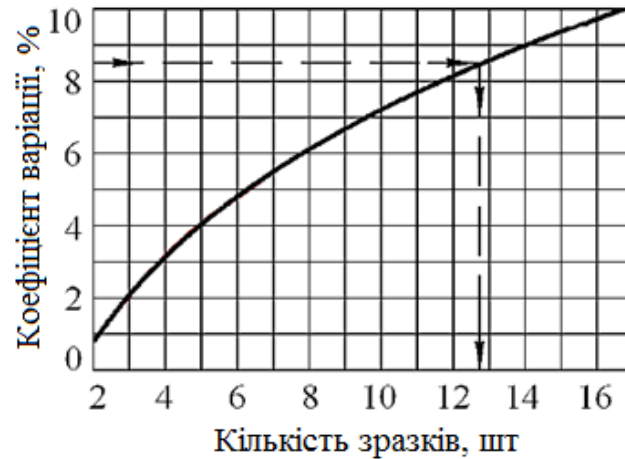


Рисунок 2.3 – Номограма для визначення мінімальної кількості зразків при величині довірчої ймовірності 0,95

Розрахунок середнього арифметичного значення розподілу величини  $x$  проводили за формулою:

$$x = (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) \cdot n^{-1}, \quad (2.9)$$

де  $x_1, x_2 \dots x_n$  – значення вимірів;

$n$  – число вимірів.

Середнє квадратичне відхилення ( $\sigma$ ) величини  $x$  розраховували за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2.10)$$

Оптимізацію проводили з використанням плану Г. Шеффе шляхом побудови математичної моделі у вигляді полінома неповного третього ступеня типу:

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (2.11)$$

$$\beta_1 = \zeta_1, \beta_{ij} = 4 \cdot \zeta_{ij} - 2 \cdot \zeta_i - 2 \cdot \zeta_j, \beta_{123} = 27 \cdot \zeta_{123} - 12 \cdot (\zeta_{12} + \zeta_{13} + \zeta_{23}) + 3 \cdot (\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3),$$

де  $\zeta_i, \zeta_j, \zeta_{ij}, \zeta_{123} \dots$  – результати дослідів в точках симплексних решіток;

$x$  – кількість матеріалу в складі (по масі), величина температури, розраховане відповідно до схеми симплексної решітки, наданої на рис. 2.4.

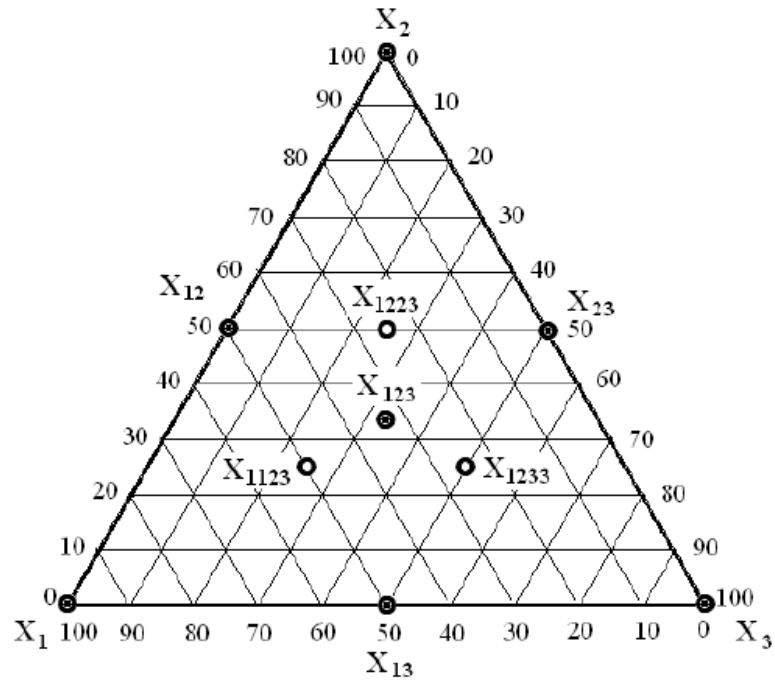


Рисунок 2.4 – Схема симплексної решітки для проведення експериментів за планом Г. Шеффе

## 2.9 Дослідження утрудненої та вільної лінійної усадки виливків

Для дослідження кінетики гальмування лінійної усадки виливків у НТФ проводилися порівняльні дослідження на прямому (див. рис. 2.5, а) і на Т-образному зразку виливка (рис 2.5, б).



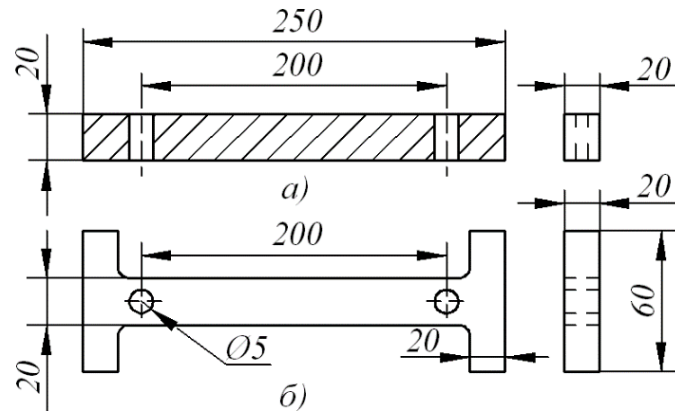


Рисунок 2.5 – Моделі зразків для визначення вільної (а) та утрудненої (б) лінійної усадок сплаву

Відповідно до рис. 2.5, б, торці зразків для визначення утрудненої усадки мають Т-образну форму за рахунок поперечних полиць. Ці полки перешкоджають усадці зразка в поздовжньому напрямку. На моделі кожного зразка передбачені отвори, які служать для виміру розмірів  $l_{\phi}$  і  $l_{вил}$ , необхідних для розрахунку лінійної усадки.

Розрахунок величини утрудненої та вільної лінійної ( $\varepsilon_{л}$ ) усадки зразків, що були охолоджені до кімнатної температури, проводили за формулою:

$$\varepsilon_{л} = \frac{l_{\phi} - l_{вил}}{l_{вил}} 100 \% . \quad (2.12)$$

де  $l_{\phi}$  – лінійний розмір форми;  $l_{вил}$  – лінійний розмір виливка.

## 2.10 Дослідження передусадкового розширення при вільній лінійній усадці виливка з сплаву АК5М2

Для визначення величини передусадкового розширення виливків зі сплаву АК5М2 використовували прилад, схема якого наданана рис. 2.6.

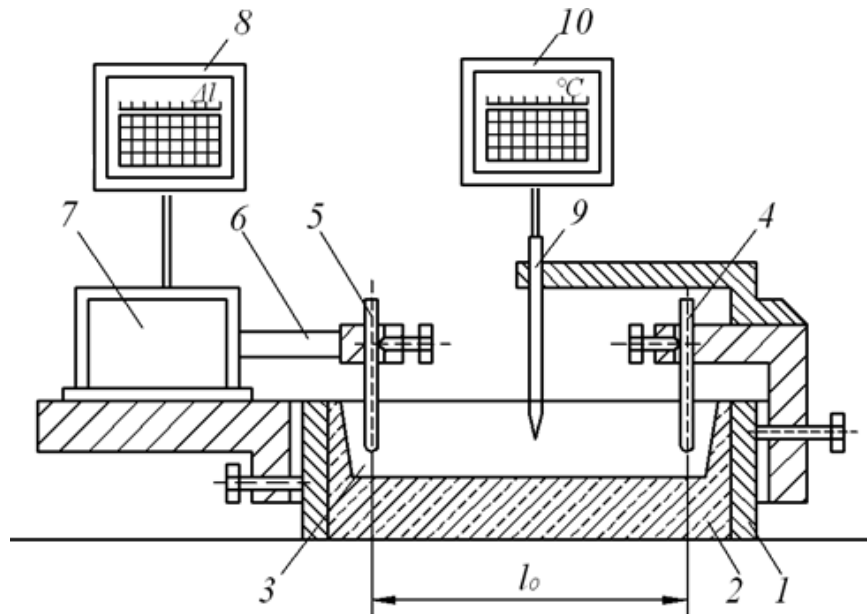


Рисунок 2.6 – Схема приладу для реєстрації кінетики передсадкового розширення:

- 1 – опока; 2 – формувальна суміш; 3 – робоча порожнина;  
 4 – нерухомий стрижень; 5 – рухомий стрижень; 6 – тяга;  
 7 – давач лінійного пересування; 8 – автоматичний записуючий прилад;  
 9 – ХА-термопара; 10 – автоматичний потенціометр

У спеціальній металевій опоці 1 із формувальної суміші 2 виконують відкриту робочу порожнину 3 для визначення передсадкового розширення. На відстані 15...20 мм від торця форми жорстко відносно опоки 1 закріплювали нерухомий стрижень 4. На такій самій відстані від протилежного торця форми закріплювали рухомий стрижень 5, який через тягу 6 був жорстко зв'язаний із давачем лінійного пересування 7, який, у свою чергу, також жорстко закріплений відносно опоки 1.

Давач 7 підключено до приладу 8, який автоматично записує зміну передсадкового розширення досліджуваного зразка на діаграмній стрічці. Температуру сплаву вимірювали ХА-термопарою 9, яку встановлювали у порожнину ливарної форми 3. Автоматичний потенціометр 10, до якого

підключено термопару 9, записував на діаграмній стрічці зміну температури сплаву при його кристалізації та охолодженні.

### 2.11 Визначення рідиноплинності алюмінієвого розплаву

Рідиноплинність алюмінієвого сплаву визначалася за ГОСТ 16438-70.

Форму спіральної проби виготовляли в парних опоках з ручним ущільненням сумішей НТС після чого їх заморожували при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Зібрану форму встановлювали під заливку строго горизонтально по рівню.

Для проведення досліджень готували сплав АК5М2, який на момент заливання мав перегрів  $\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Оцінку рідиноплинності проводили шляхом виміру повної довжини залитого ливникового каналу проби.

### 2.12 Визначення шорсткості поверхні виливків

Визначення параметрів шорсткості поверхні зразків зі сплаву АК5М2, що були залиті в НТФ при  $-20$  і  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , проводили на оптичному профілометру Optical profiling system Veeco WYKO NT1100.

Виміри проводили за методикою «Вертикальна скануюча інтерферометрія». Калібрування приладу проводили по калібрувальним плитках з комплекту приладу.

Всі отримані дані відповідають стандартам: ASME B46.1-1995, ISO 4287-1997, ГОСТ 25142–82.

### 2.13 Дослідження мікроструктури сплаву АК5М2 при заливці в НТФ

Вплив НТФ на мікроструктуру литого сплаву АК5М2 (ГОСТ 1583–93) оцінювали на литих зразках з розмірами  $\text{Ø}15 \times 100$  мм, відлитих в НТФ з початковою температурою  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ПГФ ( $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) і сталевий кокіль ( $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Схема НТФ і ПГФ для отримання зразків представлена на рис. 2.7.

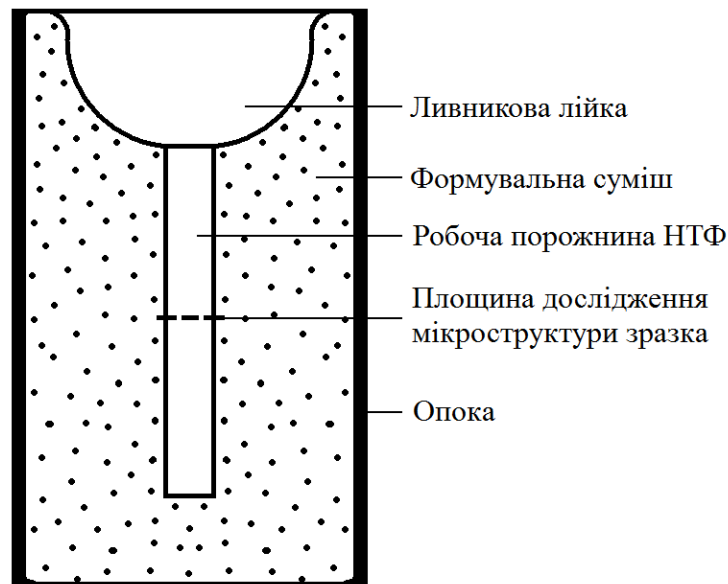


Рисунок 2.7 – Схема НТФ і ПГФ для отримання зразків

Склад формувальних сумішей НТС і ПГС наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Склад сумішей НТС і ПГС

Суміш	Вміст, % (за масою)		
	Пісок кварцовий	Глина бентонітова	Вода водопровідна
ПГС	90	5	5
НТС	95	0	5
	90	5	5

Виправку сплаву АК5М2 проводили в печі опору в графітовому тиглі металомісткістю (по алюмінію) 1 кг.

У якості шихти використовували первинний сплав АК5М2 (ГОСТ 1583-93). Перегрів розплаву при заливці форм з тигля становив  $120 \pm 5^\circ\text{C}$ . Температуру розплаву вимірювали хромель-алюмелевою термопарою у комплекті з потенціометром КСП-4.

Поперечну розрізку зразків, що охолодилися до кімнатної температури, проводили відповідно до схеми на рис. 2.7.

Мікроструктуру зразків досліджували на мікроскопі Neophot-32 після їх травлення у водному розчині 0,01% HF.

#### 2.14 Висновки

1. У роботі використані стандартні методи, апаратура і оригінальні методики, які дозволили встановити об'єктивний зв'язок між досліджуваними параметрами.

2. На основі стандартних методів досліджень розроблені методики, що дозволяють провести якісну і кількісну оцінку досліджуваних параметрів.

РОЗДІЛ 3  
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ВЛАСТИВОСТЕЙ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ФОРМ

3.1 Вплив вмісту глини та води на технологічні властивості низькотемпературної суміші

За результатами огляду науково-технічної та патентної літератури встановлено, що з числа характеристик будь-якоїформувальної і стрижневої суміші найбільш значущими є її обсипальність, міцність і газопроникність. У зв'язку з цим спочатку були досліджені вищевказані властивості.

З метою визначення залежності обсипальності НТС від вмісту глини, були виготовлені циліндричні зразки  $\varnothing 50 \times 50$  мм, які заморожувалися до  $-15$  °С. Визначення обсипальності проводили за методикою ГОСТ23409.9-78.

Випробувана суміш складалася з кварцового піску  $1K_3O_3$ 016, 5% води і до 7% глини. В одному випадку досліджувався вплив вмісту каолінової глини марки С2Т<sub>2</sub>, в іншому – бентонітової глини марки С2Т<sub>2</sub>. Результати досліджень наведені в табл. 3.1 і представлені у вигляді залежностей на рис. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вплив масового вмісту глини на обсипальність НТФ

№	Каолінова глина, %	Обсипальність, % (за масою)	№	Бентонітова глина, %	Обсипальність, % (за масою)
1	0	4,1±0,2	6.	0	3,8±0,19
2	1,5	3,9±0,19	7.	0,5	4±0,2
3	4,2	2,8±0,14	8.	2	2±0,1
4	5,8	2,1±0,1	9.	5	0,5±0,02
5	6,8	1,9±0,09	10.	7	0,5±0,02

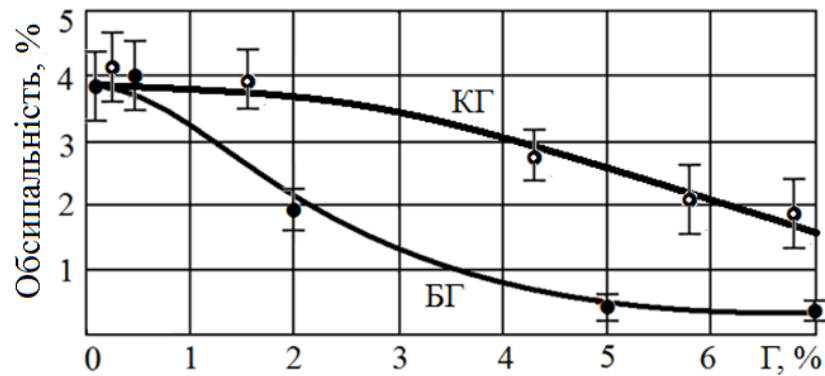


Рисунок 3.1 – Залежність обсіпальності суміші з 5% води від вмісту бентонітової (БГ) і каолінової глини (КГ) при  $-15^{\circ}\text{C}$

З отриманих результатів встановлено, що найбільшу обсіпальність (3,8...4,1%) мають суміші з піску і води. Додавання бентонітової та каолінової глини призводить до зменшення обсіпальності. При цьому, добавка 5% бентонітової глини призводить до зменшення обсіпальності у 8 разів. Подальше збільшення вмісту глини (понад 5%) не приводило до зменшення обсіпальності. При додаванні каолінової глини обсіпальність знижувалася в  $\sim 2,5$  рази.

Крім води і глини на міцність НТФ впливає і її температура про що свідчать експериментальні данні, які наведені в роботі [99], а також залежності міцності на стиск суміші з 5% бентонітової глини (за масою) при різній температурі від вмісту води, що представлені на рис. 3.2.

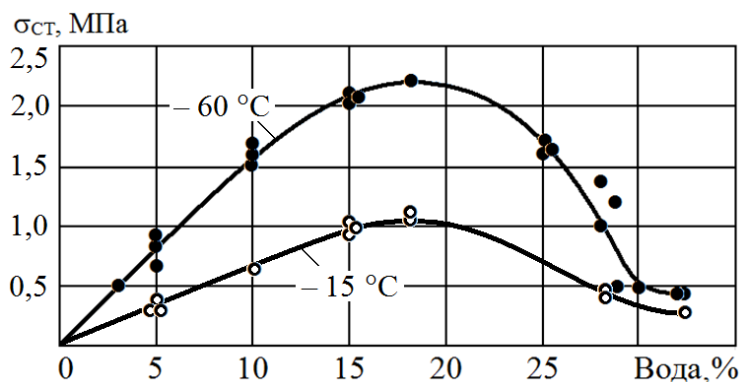


Рисунок 3.2 – Залежність міцності на стиск суміші з 5% (за масою) бентонітової глини при різній температурі від вмісту води

З аналізу даних на рис. 3.2 випливає, що з підвищенням температури і вмісту в суміші води до 18% міцність НТФ збільшується, при більш високому вмісті води міцність НТФ знижується. Ця закономірність, мабуть, обумовлена ступенем заповненості водою пор суміші, яка максимального значення для піску Вільногірського родовища досягає при 18% за масою.

Подальше підвищення вмісту води в суміші призводить до виникнення в ній безперервної крижаної фази. Тобто міцність суміші починає більшою мірою залежати від міцності льоду. При вмісті води в суміші більше 30%, пісок і глина повністю втрачають свою здатність впливати на міцність НТФ і її міцність цілком залежить від міцності льоду при даній температурі [62].

Для визначення впливу за результатами попередніх досліджень встановлено, що додавання глини у суміш до 3%, води від 5 до 15%, а також зниження температури форми від  $-10$  до  $-60$  °С значно підвищує міцність НТФ, але робить їх вкрай нетехнологічними [50, 102, 114]. Тому для визначення впливу параметрів замороженої суміші на її газопроникність використовували суміші піску з 5% каолінової глини та води 3...6%, а також суміші піску з 5% бентонітової глини та води 3...6%, які досліджували при  $-20$  °С. Результати досліджень надано в табл. 3.2 та рис. 3.3.

Таблиця 3.2 – Газопроникність НТФ

НТС, с 5% (по масі)	Газопроникність форми, од (масова частка води, %)			
	3	4	5	6
Бентонітова глина	117±5,8	106±5,3	92±4,6	83±4,1
Каолінова глина	122±6,1	114±5,7	100±5	95±4,7

З аналізу даних табл. 3.2 та рис. 3.3 витікає, що збільшення вологості суміші як з каоліновою, так і з бентонітовою глиною знижує газопроникність. Однак газопроникність НТС з каоліновою глиною вище, це пов'язано з тим, що бентонітові глини мають великий ступінь набухання, внаслідок чого площа контакту зерен піску збільшується. У сумішах з



бентонітовою глиною слід обмежити вміст води до 5%, тому що подальше збільшення масової частки води призводить до зниження газопроникності, яка досягає неприпустимих меж.

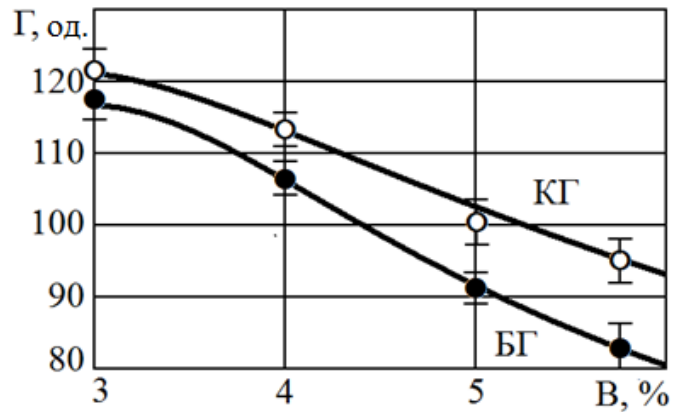


Рисунок 3.3 – Газопроникність суміші з 5% бентонітової (БГ) і каолінової (КГ) глини від вмісту в ній води при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 3.2 Вплив води на плинність піщано-глинистої формувальної суміші та міцність НТФ

Якість ливарної форми, яка в значній мірі визначає якість вилівка, залежить від цілого ряду властивостей формувальної суміші. Для процесу формоутворення особливе значення мають пластичні властивості, які дозволяють оцінити реакцію суміші на зовнішнє зусилля, тобто здатність формуватися. Здатність сумішей до деформації визначається плинністю.

Плинність характеризує здатність формувальної суміші під дією зовнішнього тиску отримувати пластичні деформації без зміни об'єму і заповнювати порожнину форми або стрижневого ящика [61]. Ця властивість визначає рівномірність розподілу суміші при ущільненні по всьому об'єму форми.

Вплив плинності (опору зрушенню) залежить від внутрішнього тертя суміші і від сил взаємного зчеплення. Сили зчеплення, що діють в сумішах, обумовлені молекулярними і капілярними силами. У сумішах НТФ, що складаються з піску, води і глини – сили зчеплення залежать від вмісту води і глини.

Для дослідження впливу вмісту води на плинність ПГС були досліджені суміші в першому випадку з 5% каолінової глини і в другому випадку з 5% бентонітової глини. Вміст води в цих сумішах становив від 3 до 7%. Результати визначення плинності сумішей для виготовлення НТФ наведені в табл. 3.3...3.4 та надані на рис. 3.4.

Таблиця 3.3 – Результати визначення плинності сумішей піску з 5% бентонітової глини

Масова частка води, %	3	3,4	3,9	5	6,8
Плинність, %	47	53	57	61	61

Таблиця 3.4 – Результати визначення плинності сумішей піску з 5% каолінової глини

Масова частка води, %	3,1	3,8	4,0	5	5,5	6,5
Плинність, %	46	47	48	50	49	50

При цьому щільність досліджених сумішей з підвищенням масової частки води до 5...6% збільшується на 10...12%.

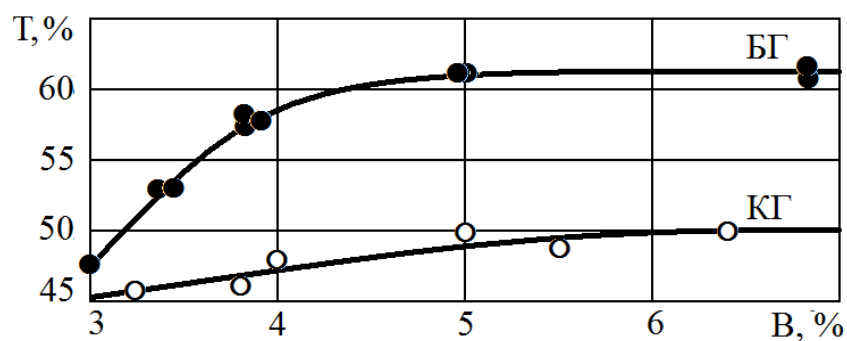


Рисунок 3.4 – Вплив вмісту води на плинність піщано-глинистої суміші з 5% бентонітової (БГ) і каолінової глини (КГ)

Аналіз наведених результатів показує, що зі збільшенням вмісту води плинність суміші збільшується з 47 до 61% для суміші з бентонітовою глиною і з 46 до 50% для суміші з каоліновою глиною. При цьому збільшення води у суміші з бентонітовою глиною більше 5% не призводить до збільшення плинності.

Таким чином, виходячи з міркувань отримання достатнього рівня механічних властивостей, газопроникності і плинності можна вважати, що доцільне значення вмісту води та глини у формувальній суміші для виготовлення НТФ повинно становити 5% кожного.

### 3.3 Вплив режиму заморожування низькотемпературних форм на випаровування з них води

Якість поверхні вилівка багато в чому визначається поверхневою міцністю форми або обсипальністю. Механічні властивості НТФ залежать від таких технологічних параметрів, як вміст води і температура охолодження.

Якщо температура охолодження може регулюватися в широких межах з точністю похибки вимірювальної апаратури, то вміст води у формувальній суміші після заморожування проконтролювати складніше, а управляти ним неможливо. З огляду на те, що процеси випаровування води відбуваються інтенсивніше при фазовому переході «вода – пар», ніж при сублімації, поверхневий шар формувальної суміші при охолодженні форми буде втрачати воду в основному тільки до моменту досягнення температури 0 °С. Отже, вміст води у поверхневому шарі НТФ буде визначатися швидкістю, тобто способом заморожування.

Для забезпечення мінімальної втрати води в поверхневому шарі НТФ швидкість охолодження повинна бути максимальною. Слід враховувати, що не всі методи заморожування дозволяють контролювати параметр вмісту води і керувати ним.

Найбільш повільне охолодження форми відбувається при об'ємному заморожуванні (в морозильній камері, прохідному тунелі і т.д.).

З метою зниження обсипання поверхневого шару форми за рахунок висихання було досліджено вплив режиму охолодження в морозильній камері на вміст води в суміші. Для цього з НТС виготовляли зразки у вигляді кубу зі стороною 200 мм, яку ущільнювали і містили в морозильну камеру з різною початковою температурою. В одному випадку робочий об'єм морозильної камери мав кімнатну температуру, а в іншому випадку був попередньо охолоджений до 0 °С та до –20 °С. Зразки охолоджували до однакової температури –20 °С, після чого відбирали проби суміші з ділянок, розташованих на різній глибині від поверхні, і визначали в них масову частку води. Результати досліджень надані в табл. 3.5 та наведені на рис. 3.5.

Таблиця 3.5 – Зміна масової частки води в суміші при охолодженні по різних режимах до кінцевої температури морозильної камери –20 °С

Глибина відбору проб, мм	Зміна масової частки води в суміші, %		
	початкова температура робочого об'єму камери		
	20 °С	0 °С	–20 °С
1	11,3	7,2	1,9
3	6,1	3,6	1
7	3,3	1	0,1
12	1	0,1	0
16	0,2	0	0

В результаті проведених експериментів встановлено, що найбільша втрата води поверхневих шарів 11,3% на глибині відбору проб 1 мм спостерігалась у зразків, які заморожувались з початковою температурою морозильної камери 20 °С. У той час як вже при зниженні початкової температури морозильної камери до 0 °С, призводило до зниження втрати води поверхневих шарах зразків до 7%.

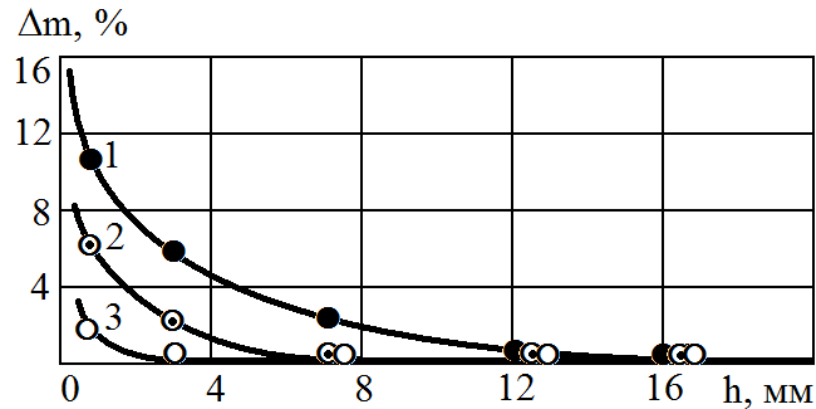


Рисунок 3.5 – Зміна вмісту води в поверхневому шарі НТФ з 5% бентонітової глини в залежності від початкової ( $t_{пх}$ ) температури в холодильній камері при кінцевій температурі ( $t_{кх}$ )  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$1 - t_{пх} = +20\text{ }^{\circ}\text{C}; \quad 2 - t_{пх} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}; \quad 3 - t_{пх} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Найменша втрата води поверхневих шарів спостерігалася у зразків з початковою температурою морозильної камери  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  і становила 1,9%. На глибині 3 мм спостерігалася зниження втрати води поверхневих шарів приблизно в 2 рази при всіх режимах заморожування. Тобто, чим менше різниця початкової і кінцевої температури морозильної камери, тим менше втрата води в поверхневих шарах НТФ.

Отже, для запобігання обсипання поверхні форми і щоб уникнути зниження механічних властивостей в результаті втрати води при об'ємному заморожуванні необхідно виконувати попереднє охолодження робочих об'ємів морозильних установок.

### 3.4 Вплив способу підготовки води та глини на властивості НТФ

Для дослідження впливу різних видів вод і глин на властивості НТФ були використані:

- пісок марки 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>016;
- глина каолінова марки С2Т<sub>2</sub> в свіжоприготовленому і набряклому вигляді;

- глина бентонітова марки С2Т<sub>2</sub> в свіжоприготовленому і набряклому вигляді;
- вода водопровідна;
- вода кип'ячена;
- вода насичена СО<sub>2</sub>.

Для набухання глини в формувальних сумішах, суміш витримували 24 години в щільно закритому посуді, щоб уникнути втрат сумішшю води.

З підготовлених формувальних сумішей виготовляли зразки Ø50×50 мм. Для затвердіння зразки містили в морозильну камеру, де охолоджували їх до температури –15 °С і витримували при цій температурі не менше 12 годин. Після закінчення виготовлення проводили випробування зразків на міцність при стисненні і на обсипальність.

Склади формувальних сумішей і результати визначення властивостей НТФ наведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Склади формувальних сумішей та властивості НТФ

№	Пісок 1К <sub>3</sub> О <sub>3</sub> 016, % (за масою)	Глина С2Т <sub>2</sub> , (5%, за масою)	Час контакту з водою, год.	Підготовка води (5%, за масою)	Властивості при –15°С	
					σ <sub>СТ</sub> , МПа	Обсипальність, % (за масою)
1	2	3	4	5	6	7
1	90	Бентоніт	24	К	3,69-5,22	0,05-0,11
2				В	0,54-0,59	0,01-0,12
3				СО <sub>2</sub>	0,22-0,25	
4			0,1	К	0,98-1,09	
5				В	0,34-0,41	0,60-0,65
6				СО <sub>2</sub>	3,00-3,11	1,05-1,15

продовження табл. 3.6

1	2	3	4	5	6	7
7	90	Каолін	24	К	0,83-0,87	
8				В	1,95-2,01	1,14-1,22
9				CO <sub>2</sub>	0,16-0,20	
10			0,1	К	0,53-0,57	
11				В	0,95-1,02	0,77-0,82
12				CO <sub>2</sub>	3,00-3,08	3,44-4,00
13	95	нема	0,1	В	0,10-0,12	3,8-3,9

Примітка: К – вода кип'ячена; В – вода водопровідна; CO<sub>2</sub> – вода газована

Аналіз отриманих даних показує, що найбільшу міцність на стиск 3,69...5,22 МПа мають зразки з формувальною сумішшю № 1 (кварцовий пісок, бентонітова глина, витримана 24 годин, кип'ячена вода), це пояснюється тим, що в процесі набухання бентонітової глини 2, сполучне обволікає частинки піску 1, яке зменшує сили когезії між ними, набуваючи здатність пластично деформуватися під дією навантаження, що схематично надано на рис 3.6.

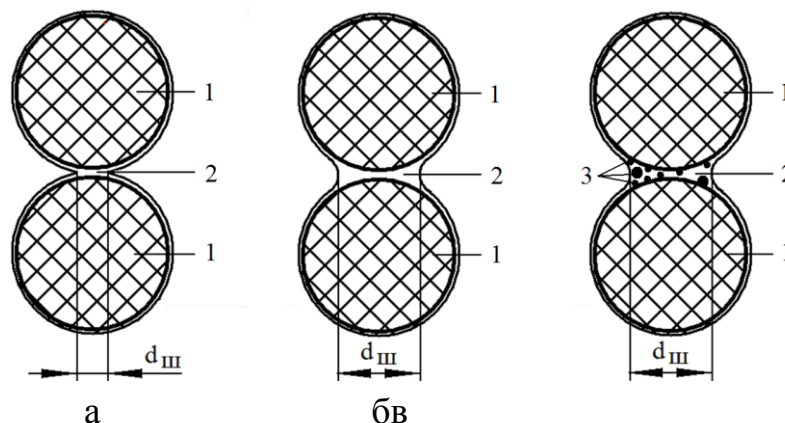


Рисунок 3.6 – Схема «містків» між піщинками з ненабряклогою (а), набряклогою (б) і набряклогою з бульбашками CO<sub>2</sub> (в) глини з водою:

1 – частинки піску; 2 – сполучне (глина з водою); 3 – CO<sub>2</sub>

Зразки з формувальною сумішшю №6 і №12 мають однаково високі показання міцності на стиск 3,00...3,11 МПа (каолінова та бентонітова глина з газованою водою, свіжоприготовлена). Вступаючи в реакцію глини з насиченою  $\text{CO}_2$  водою, мабуть, відбувається утворення середньої солі – карбонату алюмінію. Ця реакція проходить при 0 °С [82], що в даному випадку, ймовірно, і призвело до різкого підвищення міцності НТФ, але не знизило їх обсіпальність.

При цьому, ці ж склади формувальної суміші при витримці 24 год. (№3 і №9) характеризуються зниженою міцність на стиск, що пояснюється появою у воді бульбашок газу 3 (див. рис. 3.6, в), які розпушують водно-глинисту суміш, роблячи її пористою.

З викладеного випливає, що підвищення міцності і зниження обсіпальності НТФ обумовлено як структурою льоду, хімічним складом глини, так і площею контакту глини з піском. Структура льоду залежить від кількості розчинених у воді газів, що випливає з зображень льоду наданих на рис. 3.7.

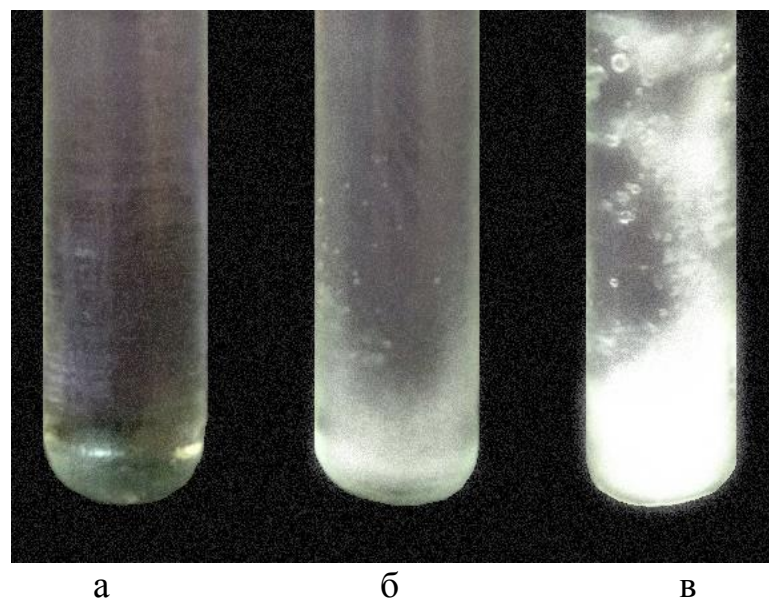


Рисунок 3.7 – Вид льоду в донній частині пробірок, з кип'яченою (а), водопровідною (б) і насиченою  $\text{CO}_2$  (в) водою



Чим більше газів розчинено у воді, тим більше пухкі, крихкі і слабкі крижані структури утворюються при замерзанні води, тим нижче міцність НТФ. Виділення бульбашок газу з води при її кристалізації позначається не тільки на структурі льоду, але і на структурі глини. Про це свідчать структури сумішей глини і води, що заморожені в пропорції 1/1 за масою, і надані на рис. 3.8 і рис. 3.9.

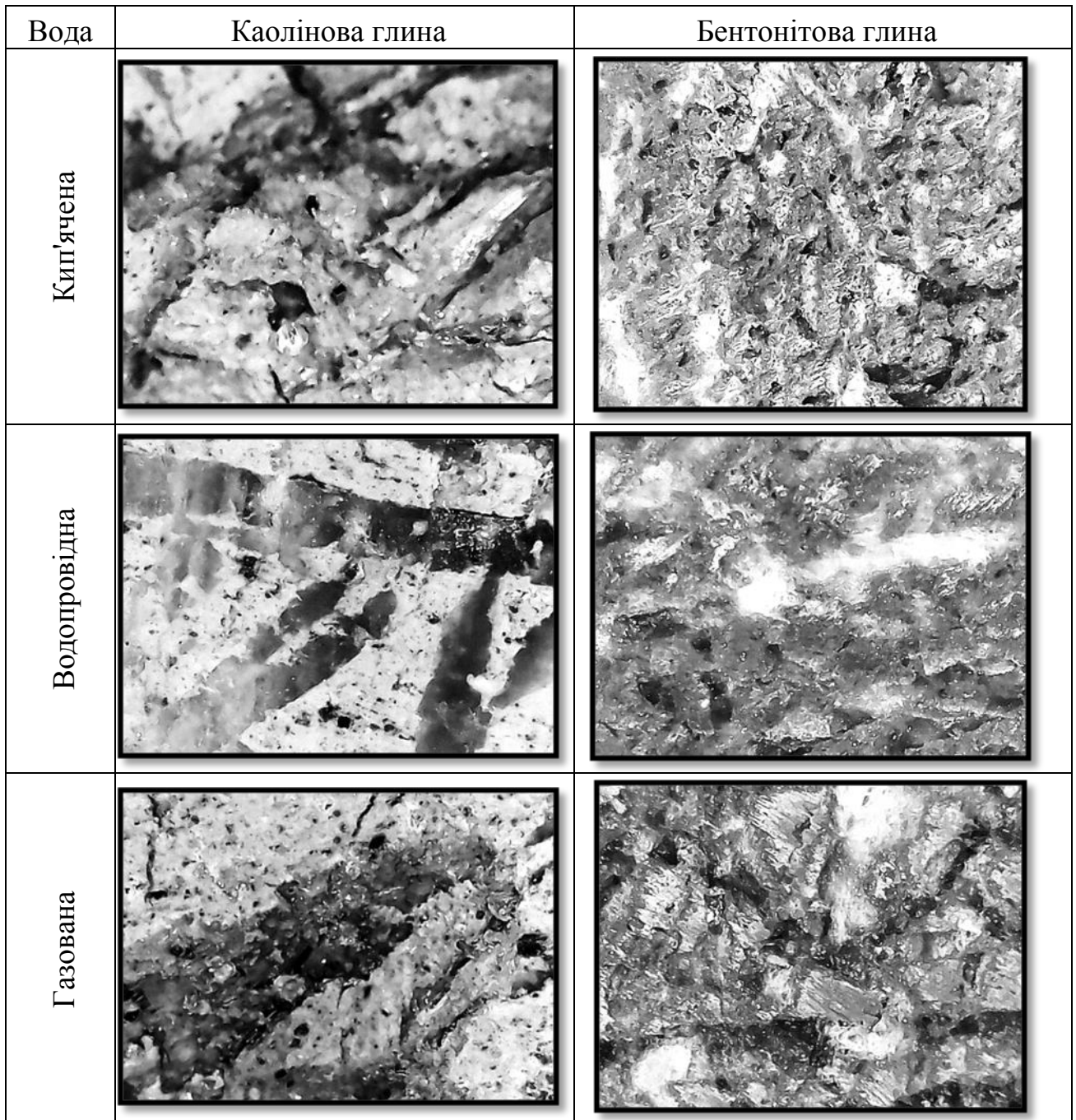


Рисунок 3.8—Структура замороженої суміші каолінової і бентонітової глини з водою(×10)

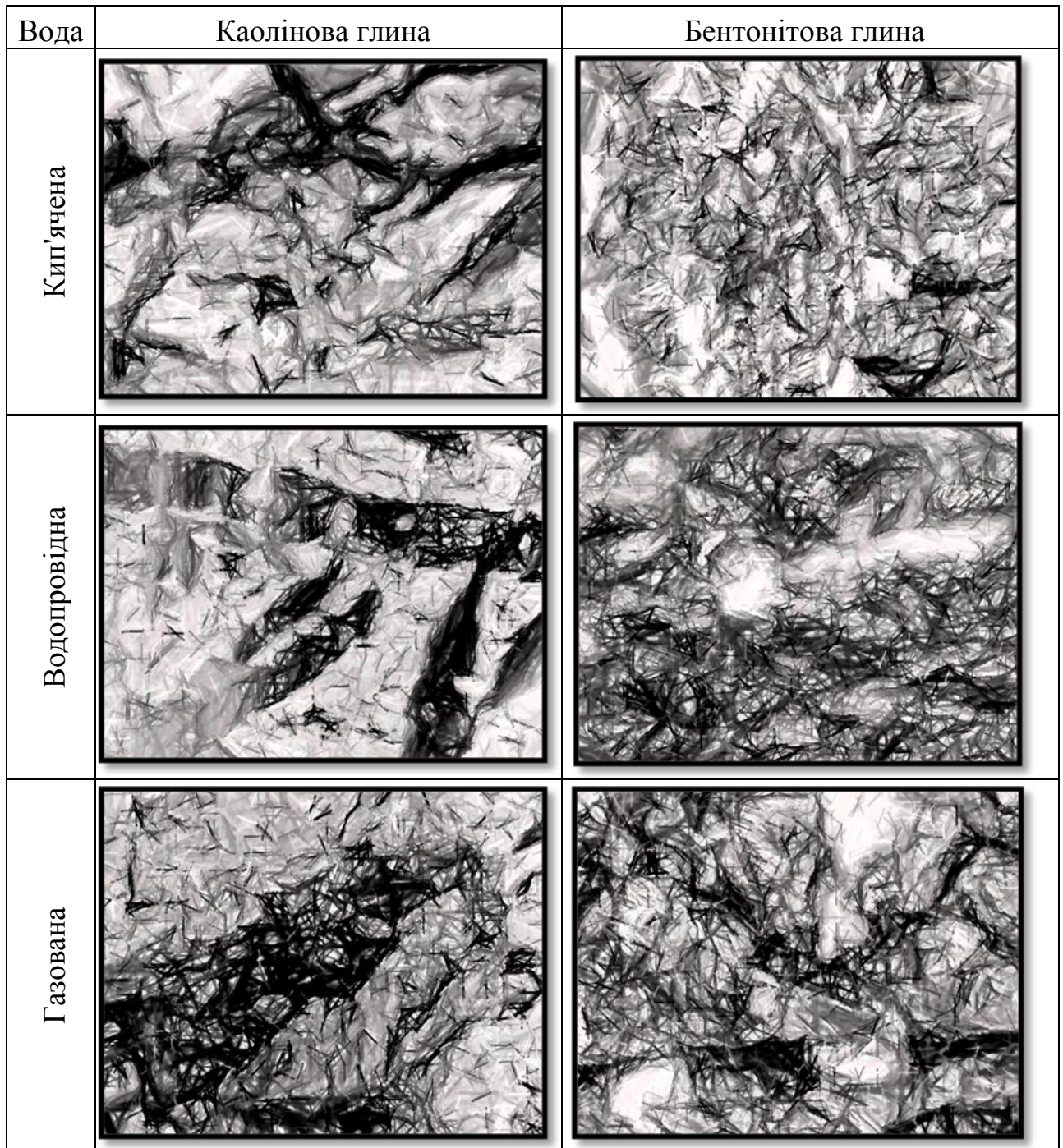


Рисунок 3.9 – Вид комп'ютерно-ретушованої структури замороженої суміші каолінової і бентонітової глини з водою ( $\times 10$ )

З рис. 3.8 і рис. 3.9 випливає, що зі збільшенням вмісту газів у воді 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 перевершують розміри

дендритів в бентонітовій глині.

У свою чергу каолінова глина не дала таких підвищених показників межі міцності на стиск, як бентонітова глина. Це пояснюється тим, що в каолініті молекули води розташовуються по краях молекулярних пакетів, а в монтморилоніті вода проникає між пакетами. В результаті цього збільшення об'єму набухання монтморилонітів значно більше, ніж каолінітові, отже, площа поверхні зв'язків між частинками піску збільшується, а разом з тим і міцність суміші.

Говорячи про НТФ слід зазначити, що незважаючи на істотне підвищення міцності для виготовлення НТФ, в умовах ливарного цеху, при використанні холоду, що штучно виробляється, доцільно прагнути до зниження її початкової температури як з точки зору зниження енергетичних витрат на вироблення холоду і скорочення циклу виробництва НТФ, так і з точки зору дотримання техніки безпеки роботи з НТФ. З цієї причини максимальне охолодження НТФ слід обмежити  $-10...-20$  °С.

Розглядаючи вплив глини, слід зазначити її сприятливий вплив і на обсіпальність НТФ, що впливає з залежності обсіпальності суміші з 5% (за масою) води від вмісту в ній бентонітової глини при  $-15$  °С, наданої на рис. 3.1.

З аналізу залежності на рис. 3.1 випливає, що зі збільшенням вмісту глини в суміші її обсіпальність монотонно знижується. Ця закономірність пояснюється тим, що глина, як пілоподібна складова суміші спільно з водою утворює більш міцні міжзернові містки і, володіючи певними клейовими здібностями, в цілому сприяє не тільки на підвищення міцності, плинності і пластичності суміші, а й на зниження її обсіпальності.

3.5 Дослідження кінетики руйнування НТФ при витримці на повітрі з додатною температурою та динамічним впливом

У дослідженнях використовували зразки сумішей, попередньо

охолоджені до  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що склалися з кварцового піску з 5% води, з кварцового піску з 5% води і 5% бентонітової глини, а також з кварцового піску з 5% води і 5% каолінової глини .

Результати визначення зниження маси піддослідних зразків в процесі їх випробувань при температурі повітря  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  і безперервного динамічного впливу наведені в табл. 3.7 і в вигляді залежностей представлені на рис. 3.10.

Таблиця 3.7 – Втрата маси зразком у часі

Глина	Час набухання глини, год	Втрата маси зразком (%)									
		час дії динамічного впливу на зразок, хв									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Без глини		3,90	0,31	0,17	0,17	0,67	P				
Каолінова	0,1	0,820	0,085	0,099	0,099	4,13	P				
	24	1,22	0,24	0,11	0,10	0,41	P				
Бентонітова	0,1	0,650	0,160	0,028	0,007	0,097	0,260	0,260	0,800	2,940	P
	24	0,006	0,052	0,007	0,026	0,079	0,007	0,007	0,150	0,250	P

Примітки. P – руйнування зразка

Аналіз отриманих даних показує, що найбільшою обсіпальністю характеризується суміш піску і води (див. табл. 3.7). Додавання до складу суміші глини різко знижує обсіпальність зразків. Тобто, величина  $O_c$  стає 0,82% при введенні каолінової глини і  $O_c = 0,65\%$  при введенні бентонітової глини.

Витримка сумішей з глиною протягом 24 годин ще більше зменшує обсіпальність зразків при введенні бентонітової глини (до  $O_c = 0,006\%$ ), але збільшує до  $O_c = 1,022\%$  обсіпальність зразків при введенні каолінової глини.

При цьому, в умовах неперервного динамічного впливу живучість зразків з піску з водою і з піску, з будь якою водою і каоліновою глиною становить 6 хвилин, а з бентонітовою глиною – 10 хвилин. Тобто, з точки зору технологічності виготовляються НТФ, з число досліджених складів, суміші піску з водою і бентонітовою глиною є кращими.

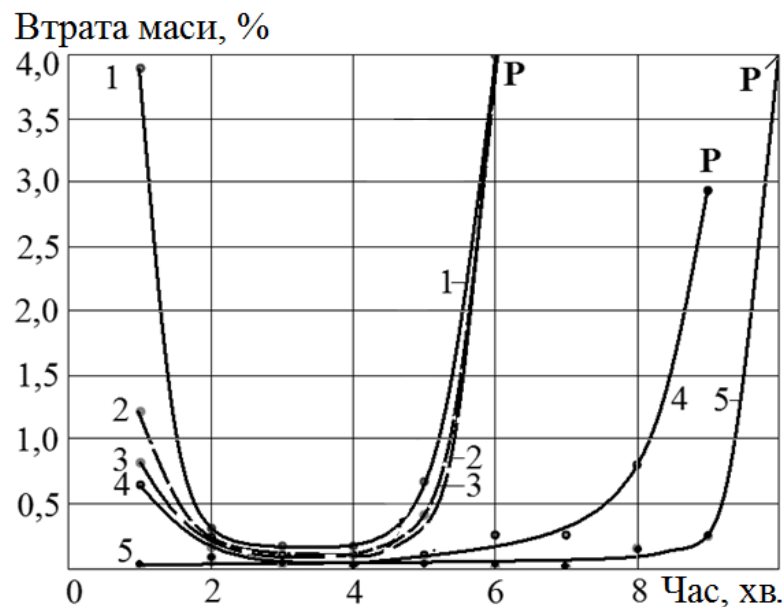


Рисунок 3.10 – Кінетичні криві руйнування зразків під динамічним впливом:

- 1 – без глини; 2 – каолінова набрякла глина; 3 – каолінова ненабрякла глина; 4 – бентонітова ненабрякла глина; 5 – бентонітова набрякла глина

В свою чергу, з числа сумішей з бентонітовою глиною особливий інтерес представляють суміші з набряклою глиною в кип'яченій воді, міцність яких перевищує міцність всіх інших сумішей в 30...50 разів при найменшій величині обсіпальності. Результати визначення зниження маси



таких зразків в процесі їх випробувань при температурі повітря  $+20^{\circ}\text{C}$  і безперервного динамічного впливу представлені на рис. 3.11.

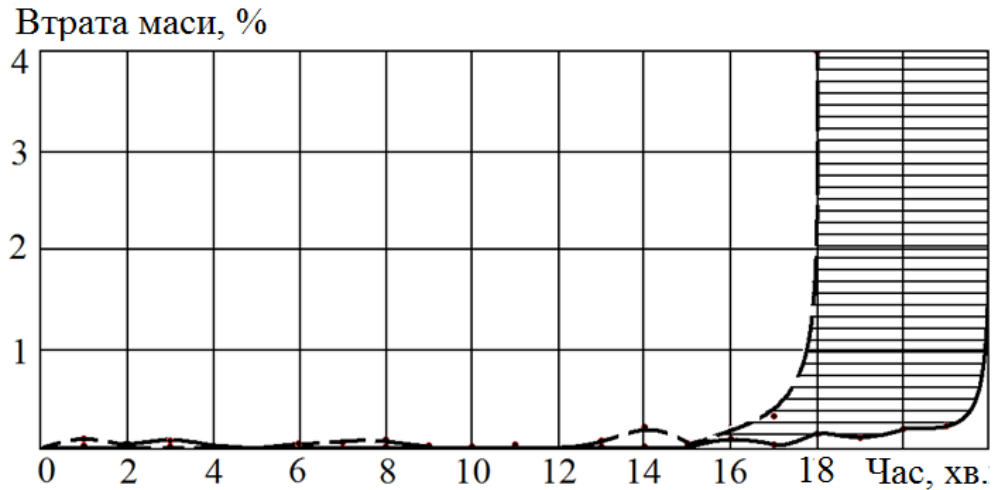


Рисунок 3.11 – Кінетичні криві руйнування під динамічним впливом зразків з бентонітовою глиною, що набрякла у кип'яченій воді

Аналіз ходу залежностей на рис. 3.11 показує, що застосування кип'яченої води для тривалого (не менше 24 годин) набухання бентонітової глини сприяє як різкому підвищенню міцності НТФ вже при  $-15^{\circ}\text{C}$ , так і збільшенню живучості зразків до 18...22 хв.

Причиною такого впливу, ймовірно, є:

- значне набухання бентонітової глини, що збільшує поперечний переріз містків-контактів між піщинками;
- збільшення міцності льоду за рахунок видалення з води кип'ятінням розчинених в ній газів.

Аналізуючи наведені вище дані, слід зазначити, що не у всіх ливарних цехах можливо для виробництва НТФ використовувати підготовлену (кип'ячену, газовану) воду. У зв'язку з цим, подальші дослідження проводили для сумішей піску, бентонітової ненабряклої глини і водопровідної води – тобто для найгірших умов формування властивостей НТФ.

В цілому, кінетику руйнування зразків, що оцінюється за відносною величиною втрати їх маси в часі, можна представити у вигляді узагальненої залежності на рис. 3.12. Відповідно з рис. 3.12, в процесі руйнування НТФ можна виділити три тимчасових етапи.

Етап 1 (на рис. 3.12 – ділянка А-В, час  $0 \dots \tau_1$ ) – інтенсивне руйнування поверхні (втрата маси) зразка, викликане зниженою міцністю поверхневого шару суміші. У свою чергу, знижена міцність поверхневого шару НТФ зумовлена зменшенням вмістом в ньому води через її випаровування під час заморожування формувальної суміші в НТФ.

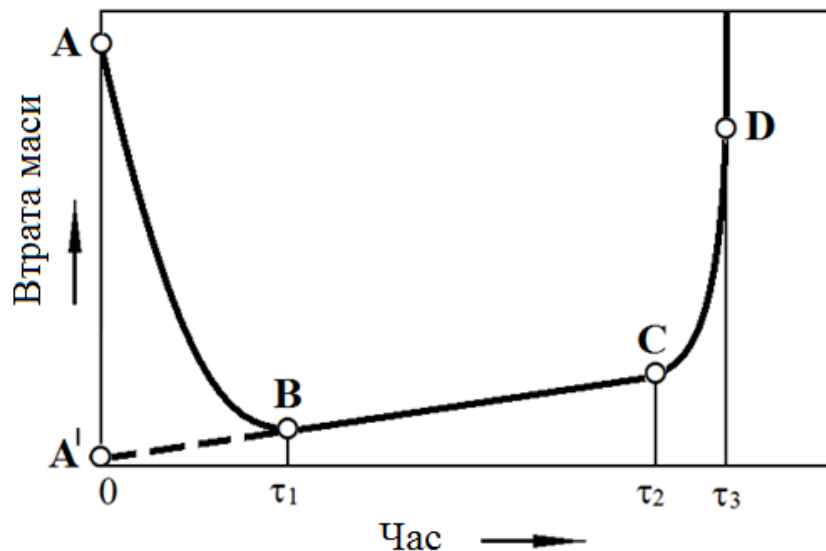


Рисунок 3.12 – Кінетична крива руйнування зразків НТФ

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.

Етап 2 (на рис. 3.12 – 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.

При цьому, мабуть, кут нахилу ділянки В-С і А'-С по відношенню до осі абсцис залежить від об'єму льоду в пористій структурі НТФ, її теплофізичних властивостей і структурних параметрів, а також морфологічних і гранулометричних характеристик використовуваного піску і властивостей глини .

Етап 3 (на рис. 3.12 – ділянка С-D, час  $\tau_2 \dots \tau_3$ ) – катастрофічно швидке руйнування зразка, що супроводжується 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.

### 3.6 Оптимізація складу суміші для низькотемпературних форм

З наведених вище результатів досліджень видно, що на фізичні, газодинамічні і технологічні властивості НТФ найбільш значущий вплив надають:

- початкова температура форми;
- вміст у НТС глини і води.

При цьому до числа найбільш відповідальних властивостей ливарної форми відносяться:

- межа міцності при стисненні;
- обсипальність;
- газопроникність.

Виходячи з цього, оптимізацію складу НТС здійснювали за вказаними вище трьома параметрами. Для оптимізації використовували метод симплекс-планування експерименту за планом Г. Шеффе з побудовою симплексних решіток для межі міцності при стисненні,



обсипальності і газопроникності форм.

Досліджувану НТС вважали оптимізованою якщо вона (див. розділ 1) відповідала наступному комплексу властивостей:

- межа міцності при стисненні – не менше 1,0 МПа;
- обсипальність – не більше 0,2%;
- газопроникність – не менше 90 од.

Оптимізацію складу здійснювали з використанням наступних матеріалів (% за масою) і параметрів: глина бентонітова, свіжоприготовлена (позначення – Гл), вода технічна (позначення – У), температура НТФ (позначення – Т). Для побудови симплексної решітки по симплекс-гратчастому плану Г. Шеффе (модель другого порядку з центральною точкою) використовували схему на рис. 2.4. Умовні позначення груп досліджуваних параметрів відповідно до схеми на рис. 2.4, їх елементний склад і коди функцій відгуків наведені в табл. 3.8 та табл. 3.9.

Таблиця 3.8 – Кодове позначення сплавів

п/п	Умовне позначення	Склад в масштабі					
		натуральному			кодованому		
		Т	Гл	В	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
		°С	(% за масою)				
1	X <sub>1</sub>	-20	3	3	1	0	0
2	X <sub>2</sub>	-10	7	7	0	1	0
3	X <sub>3</sub>	-20	7	7	0	0	1
4	X <sub>12</sub>	-15	5	5	1/2	1/2	0
5	X <sub>13</sub>	-15	7	7	1/2	0	1/2
6	X <sub>23</sub>	-20	5	5	0	1/2	1/2
7	X <sub>123</sub>	-16,6	5,6	5,6	1/3	1/3	1/3

Виходячи з того, що реалізація плану Г. Шеффе передбачає побудову моделі неповного куба в потрійній системі:

$$Y = \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \beta_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (3.1)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт регресії;

$x$  – кількість матеріалу в складі (по масі), величина температури, то коефіцієнти регресії у формулі (3.1) розраховували за формулами:

$$\beta_1 = \xi_1, \quad \beta_{ij} = 4 \cdot \xi_{ij} - 2 \cdot \xi_i - 2 \cdot \xi_j, \quad \beta_{123} = 27 \cdot \xi_{123} - 12 \cdot (\xi_{12} + \xi_{13} + \xi_{23}) + 3 \cdot (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3),$$

де  $\xi_i, \xi_j, \xi_{123}$  – результати дослідів в точках симплексних решіток.

Таблиця 3.9 – Коди функцій відгуку

Функція відгуку	Позначення	Код
Межа міцності при стисненні	$\sigma_{ст}$	$Y_1$
Обсипальність	Ос	$Y_2$
Газопроникність	Газ	$Y_3$

Результати експериментальних досліджень і результати розрахунку коефіцієнтів регресії наведені в табл. 3.10.

Адекватність отриманих математичних моделей перевіряли за результатами трьох контрольних дослідів, яким на рис. 2.4 присвоєно коди –  $X_{1123}, X_{1223}, X_{1233}$ , шляхом порівняння експериментальних і розрахункових значень для кожної з отриманих математичних моделей. Крім цього адекватність математичних моделей перевіряли порівнянням табличних і емпіричних значень t-критерію для кожної з точок  $X_{1123}, X_{1223}, X_{1233}$ .

Таблиця 3.10 – Результати експериментальних досліджень і розрахунку коефіцієнтів регресії

п/п	Функція відгуку			$\beta$	Коефіцієнти регресії		
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$		$\sigma_{ст}$	Ос	Газ
	$\sigma_{ст}$	Ос	Газ				
1	0,14	1,21	171	$\beta_1$	0,14	1,21	171
2	0,67	0,48	72	$\beta_2$	0,67	0,48	72
3	1,13	0,01	93	$\beta_3$	1,13	0,01	93
4	0,34	0,65	82	$\beta_{12}$	-0,26	-0,78	-158
5	0,81	0,51	74	$\beta_{13}$	1,58	-2,40	-124
6	1,03	0,01	101	$\beta_{23}$	-0,36	1,06	-34
7	0,60	0,42	77	$\beta_{123}$	-4,14	2,40	3

Аналіз розрахунків показав, що різниця між експериментальними і розрахунковими значеннями для кожної з отриманих математичних моделей в точках  $x_{1123}$ ,  $x_{1223}$  і  $x_{1233}$  не перевищує 2,2% і у всіх випадках  $t_{ЕКСП} < t_{ТАБЛ}$ . У зв'язку з цим гіпотеза про адекватність отриманих математичних моделей при 5% -му рівні значущості може бути прийнятою.

Використовуючи отримані математичні моделі, побудували ізолінії в симплексних решітках, які представлені на рис. 3.13...3.14.

Поле оптимальних змістів глини і води в НТС, що розробляється, отримали шляхом колірною виділення на симплексних решітках полів з неприпустимим рівнем того чи іншого параметра і наступним накладенням отриманих зображень на одну з решіток.

Поле оптимальних змістів глини і води при відповідній температурі НТФ розміщено в концентраційній сітці симплекса і виділено чорним кольором на рис. 3.15, а, ключ до симплексної решітці на рис. 3.15, б.

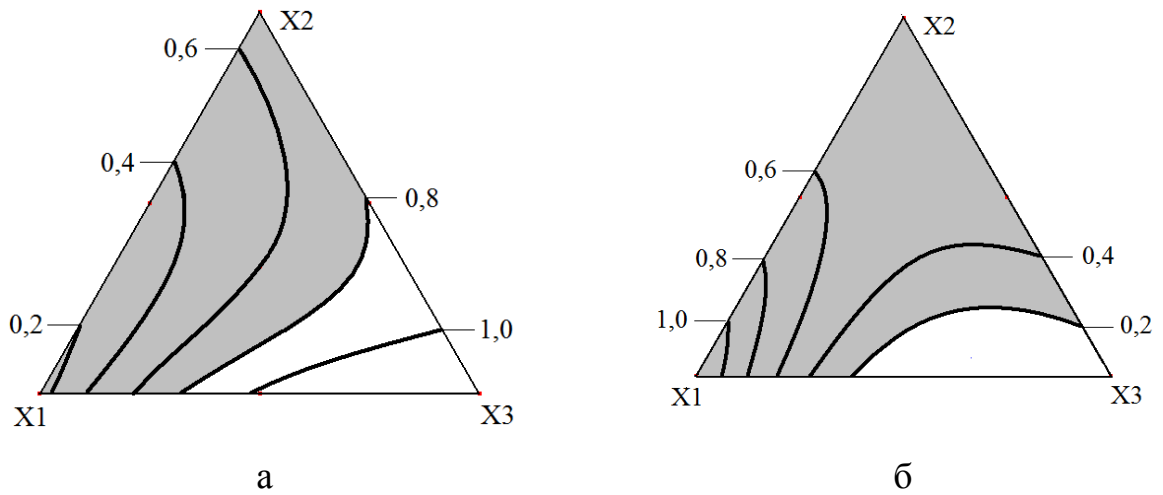


Рисунок 3.13 – Межа міцності на стиск (а) та обсіпальність (б)

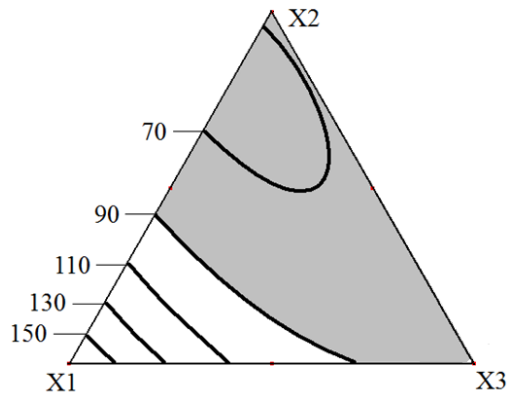


Рисунок 3.14 – Газопроникність

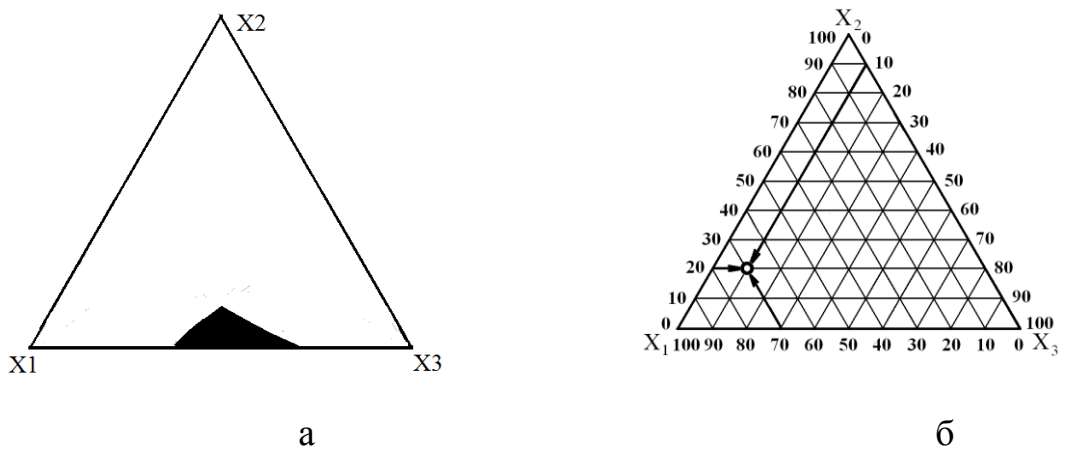


Рисунок 3.15 – Оптимальна область (затемнена) в концентраційній сітці симплекс-решітки (а) та ключ симплексної решітки (б)

Відповідно до рис. 3.15, оптимальним вмістом бентонітової глини і води в НТФ з кварцового піску марки 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>016 Вільногірського родовища (Україна) є по 5±0,2% кожного при початковій температурі не вище –20 °С. При цьому, зі збільшенням вмісту в суміші води і глини міцність суміші підвищується, а обсипальність і газопроникність знижуються.

За результатами досліджень суміші оптимізованого складу встановлено, що величина її міцності на розрив при –19...–20 °С складає  $\sigma_p = 0,27...0,31$  МПа, а міцність при статичному вигині –  $\sigma_{\text{виг}} = 0,034...0,038$  МПа.

Таким чином, за результатами проведених досліджень розроблено склад суміші для НТФ, яка складається з кварцового піску марки 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>016 Вільногірського родовища (Україна), 5±0,2% водопровідної води, 5±0,2% бентонітової глини марки С2Т<sub>2</sub> та при температурі не вище –19...–20 °С, що забезпечує НТФ наступний рівень властивостей:

- $\sigma_{\text{СТ}} = 1,0...1,1$  МПа;
- $\Gamma = 90...95$  од;
- $O_c \leq 0,2$  %;
- плинність при +20 °С – 57...60%;

та відповідає вимогам до ливарних форм, викладених в розділі 1.

Отриманні дані свідчать про те, що форми з оптимізованим складом суміші можливо використовувати для виготовлення виливків при литті під низьким тиском як це, наприклад, застосовано в роботі [109].

### 3.7 Висновки

1. Найбільшою обсипальністю володіють суміші з чистого піску і води, яка досягає 3,8...4,1% від маси зразка. Додавка до піску з водою бентонітової та каолінової глини призводить до зменшення обсипальності. При додавці 5% бентонітової глини, обсипальність зменшується в 8 разів, причому подальше збільшення вмісту глини не приводить до зменшення

обсипальності. При добавці 5% каолінової глини обсипальність зразків знижується в  $\sim 2,5$  рази.

2. З підвищенням температури і вмісту в суміші води до 18% міцність НТФ збільшується, при більш високому вмісті води міцність НТФ знижується. Ця закономірність зумовлена ступенем заповненості водою пір суміші, яка максимального значення для піску Вільногірського родовища досягає при 18% за масою.

3. Збільшення вологості суміші як з каоліновою, так і з бентонітовою глиною знижує їх газопроникність. У сумішах з бентонітовою глиною слід обмежити вміст води до 5%, тому що подальше збільшення масової частки води призводить до зниження газопроникності, яка досягає неприпустимих меж.

4. Для запобігання підвищення обсипання 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.

5. Формувальні суміші, що складаються з піску і води, не дивлячись на високу газопроникність і задовільну міцність для виготовлення НТФ слід визнати непридатними у зв'язку з високою обсипальністю.

6. Для підвищення міцності і зниження обсипальності для виробництва НТФ слід використовувати суміші піску, води і глини.

7. Природа глини, її вміст в формувальній суміші, а також спосіб підготовки води і глини до формування мають вирішальний вплив на міцність і обсипальність НТФ. Найбільшою міцністю ( $\sigma_{CT} = 3,69 \dots 5,22$  МПа) характеризуються суміші піску з 5% кип'яченої води і з 5% набряклої бентонітової глини. Середньою міцністю ( $\sigma_{CT} = 0,54 \dots 0,59$  МПа) і найменшою обсипальністю ( $O_c = 0,01 \dots 0,12\%$ ) характеризуються суміші піску з 5% водопровідної води і з 5% бентонітової глини, яка перебувала в контакті з кип'яченою водою не менше 24 годин. Найменша міцність ( $\sigma_{CT} =$

0,10...0,12 МПа) і найбільша обсипальність ( $O_c = 3,8...4,1\%$ ) у суміші піску з 5% водопровідної води.

8. Досліджено кінетику і розроблено опис етапів руйнування зразків НТФ різного складу в умовах динамічного впливу на них. Встановлено, що кінетичні криві руйнування зразків НТФ, що складаються з піску і води, а також піску, води і каолінової глини незалежно від ступеня її набухання, практично, однакові, а живучість таких НТФ в умовах динамічного впливу на них не перевищує 6 хв. У той же час, живучість НТФ з сумішею піску, води і бентонітової глини становить 10 хв, що робить бентонітову глину кращим компонентом для сумішей НТФ, ніж каолінова глина.

9. За результатами виконаних досліджень та оптимізації розроблено суміш для НТФ, яка складається з кварцового піску марки 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>016 Вільногірського родовища (Україна),  $5\pm 0,2\%$  водопровідної води,  $5\pm 0,2\%$  бентонітової глини марки С2Т<sub>2</sub> та при температурі не вище  $-19...-20$  °С, що відповідає вимогам до формувальних сумішей і має наступний рівень властивостей:  $\sigma_{CT} = 1,0...1,1$  МПа;  $\Gamma = 90...95$  од;  $O_c \leq 0,2\%$ ; плинність при  $+20$  °С – 57...60%. При цьому, зі збільшенням вмісту в суміші води і глини міцність суміші підвищується, а обсипальність і газопроникність знижуються.

РОЗДІЛ 4  
ВЗАЄМОДІЯ НТФ З РОЗПЛАВОМ І ВИЛИВКОМ  
ІЗ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВА

4.1 Гранично-припустимі значення параметрів заливки розплавів

Суміші, що застосовуються для виробництва НТФ, складаються з піску, води і глини. Як результат, в результаті плавлення льоду НТФ не руйнуються, але втрачають значну частку своєї первинної міцності. При цьому, перенесення тепла до робочих поверхонь форми в процесі її заповнення розплавом здійснюється переважно теплопровідністю через поверхні контакту сплаву і форми, де під час течії розплаву може існувати ливарна кірка або за її відсутністю проходити локальне руйнування форми, що схематично надано на рис. 4.1.

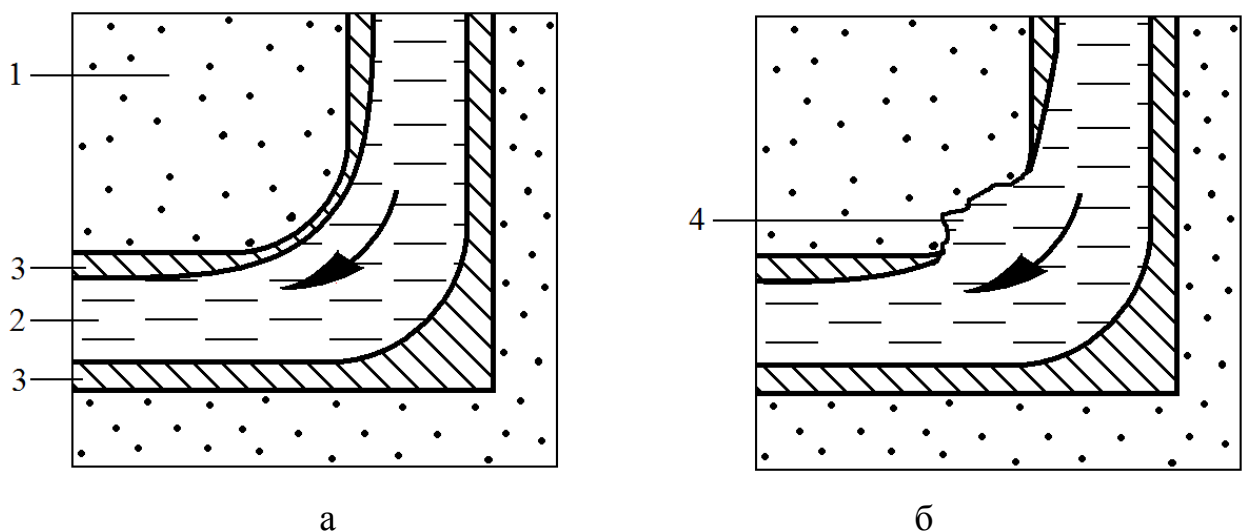


Рисунок 4.1 – Схеми розташування ливарної кірки (а) і зруйнованої частини НТФ потоком розплаву в області її галтелі (б):

1 – форма; 2 – потік розплаву; 3 – кірка затверділого розплаву;

4 – ділянка зруйнованої форми



Для більшості поверхонь форми контакт з розплавом ще в період заповнення форми супроводжується виникненням і зростанням ливарної кірки (див. рис. 4.1, а). У певний момент часу, коли величина питомого теплового потоку від розплаву до кірки перевищить величину питомого теплового потоку від кірки до форми, кірка починає плавитись. До закінчення плавлення ливарної кірки суміш втрачає міцність і частки піску зі стінки форми потоком розплаву можуть заноситися в робочі порожнини форми (див. рис. 4.1, б), формуючи в виливку засмічення.

Виходячи з цього, для попередження появи засмічення по такому механізму треба знати час існування ливарної кірки на поверхні форми, який пов'язан не тільки з теплофізичними властивостями сплаву та НТФ, але і з розмірами та числом живильників, радіусами їх галтелі при заданій металоємності форми та її питомій швидкості заливання.

#### 4.1.1 Взаємодія робочої порожнини НТФ з потоком розплаву

Оптимальна тривалість заливання будь-якої ливарної форми – один з гарантів отримання якісної виливки. У зв'язку з цим, як правило, для будь-яких форм і умов лиття проводять розрахунок часу заповнення розплавом форми. При цьому мінімально-припустима тривалість заливки, в основному, визначається [65...67]:

- необхідністю повного видалення з форми повітря і газів, що виділяються формою, стрижнями і розплавом металу;

- попередженням розмиву поверхні форм і стрижнів;

- міцністю форми і стрижнів;

Максимально-припустима тривалість заливки, в основному, визначається:

- інтенсивністю зниження температури розплаву при його перебігу по каналах форми;

- заповнюваністю форми;

– термостійкістю поверхневих шарів форми і стрижнів.

Для практичних цілей, виходячи з різноманіття конфігурацій виливків, їх положення в просторі при заливці, теплофізичних властивостей використовуваних форм і застосовуваних сплавів, і т.п., в основному, використовують спрощені емпіричні залежності в числі яких відома формула Г.М. Дубицького [68].

$$\tau = S_1 (\delta \cdot G)^{0,33}, \quad (4.1)$$

де  $S_1$  – коефіцієнт тривалості заливки, що залежить від температури рідкого металу, роду сплаву, місця його підведення, матеріалу форми;

$\delta$  – переважна товщина стінки виливка, мм;

$G$  – маса рідкого металу в формі, що припадає на один виливок, кг.

Значення коефіцієнта  $S_1$  приведені в табл. 4.1 [68].

Таблиця 4.1 – Значення коефіцієнта  $S_1$  для виливків з алюмінієвих сплавів з підведенням розплаву в них через окремі живильники [68]

Ливарна форма	$S_1$ при масі рідкого сплаву на один виливок, кг			
	До 2	2–5	5–10	10
Підігрітий кокіль	2,2	2,4	2,5	2,6
На основі піску	1,7	2,1	2,3	2,4

Стосовно до НТФ, оскільки інтенсивність тепловідведення від розплаву в НТФ знаходиться на рівні тепловідведення в ПГФ, а міцність НТФ значно вища міцності ПГФ, то виходячи з середніх значень даних табл. 4.1 залежність рекомендованої величини  $S_1$  для одного виливка від його маси матиме вигляд, наданий на рис. 4.2.

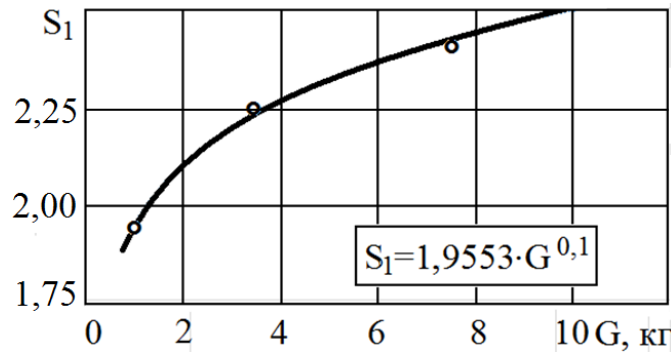


Рисунок 4.2 – Залежність рекомендованої величини  $S_1$  для одного вилівка від її маси при використанні НТФ

Відповідно до рис. 4.2, залежність  $S_1=f(G)$  буде мати вигляд:

$$S_1 = 1,9553 \cdot G^{0,1} . \quad (4.2)$$

Тоді формулу (4.1) з урахуванням (4.2) можна записати у вигляді:

$$\tau = 1,9553 \cdot G^{0,1} (\delta \cdot G)^{0,33} , \quad (4.3)$$

де раціональний час заливання форми розплавом у с, переважна товщина стінки вилівка у мм, а маса рідкого металу в формі, що припадає на один вилівок у кг.

Використовуючи (4.3), знаходимо величину рекомендованої масової витрати розплаву через живильник (живильники) при заливанні НТФ розплавом:

$$M_p = \frac{G}{\tau} = \frac{G^{0,57}}{0,19553 \cdot \delta^{0,33}} . \quad (4.4)$$

Використовуючи (4.4), побудували номограму, представлену на рис. 4.3.

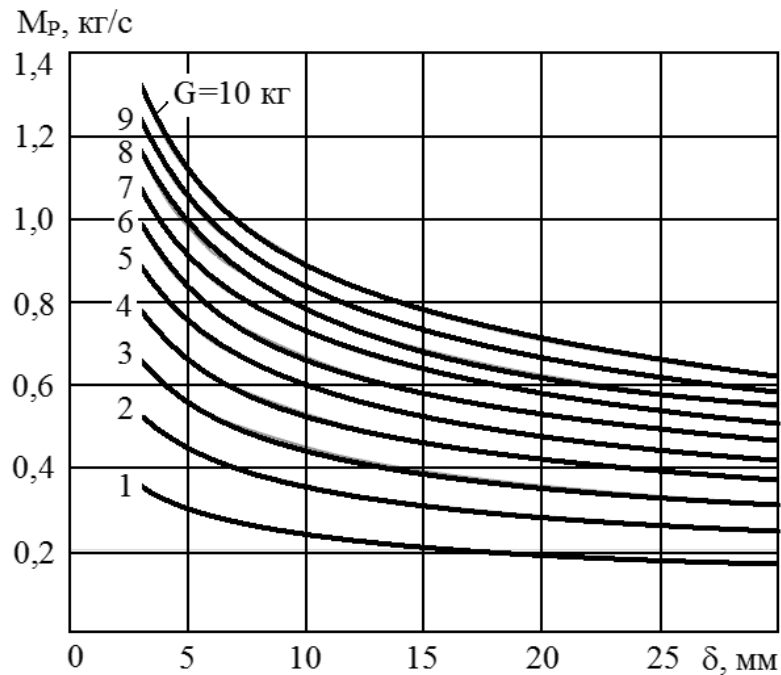


Рисунок 4.3 – Номограма для визначення рекомендованої масової витрати розплаву через живильник (живильники) при заливці НТФ розплавом алюмінієвого сплаву

З числа зазначених вище вимог і умов до заливання для НТФ найбільш проблематичним є виконання умов щодо попередження розмиву поверхні форм і стрижнів, обумовлене властивостями використовуваної в НТФ сполучної речовини – замороженої води. Тобто, танення льоду в поверхневому шарі НТФ при її заповненні розплавом і при відсутності первинної ливарної кірки затверділого розплаву на поверхні НТФ призведе до розмивання форми, замісу піщинок форми в потік розплаву і, відповідно, появи у виливку піщаного засмічення.

Таким чином, особливості технології виготовлення НТФ зумовлюють і умови їх використання. Для НТФ основною умовою отримання виливків без засмічень є попередження розплавлення ливарної кірки затверділого сплаву на поверхні ливарної форми до моменту закінчення її заповнення розплавом.

Аналіз конструкцій найбільш часто використовуваних літників для виготовлення виливків в піщані форми показав, що з точки зору термічної та гідравлічної «завантаженості» найбільш уразливими елементами форми є її зовнішні кути в області зчленування живильника (живильників) і стояка або ливникового ходу.

У зв'язку з цим умовою отримання виливка без засмічень, обумовлене руйнуванням форми в процесі її заповнення є гранично-припустима маса розплаву, що проходить через живильник. Тобто, засмічення за вказаною вище причини не виникатиме, при виконанні умови:

$$\tau_{меч} \leq \tau_s, \quad (4.5)$$

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

Виходячи з умови (4.5), гранично-припустиму масу розплаву, що пройшла через будь-який живильник, розраховуємо за формулою:

$$M = M_p \cdot \tau_s, \quad (4.6)$$

або за формулою:

$$M = F \cdot w \cdot \rho \cdot \tau_s, \quad (4.7)$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу живильника, м<sup>2</sup>;

$w$  – середня швидкість течії розплаву в живильнику, м/с;

$\rho$  – питома щільність розплаву при його перегріві на 120 °С, кг/м<sup>3</sup>.

Визначення величини  $\tau_s$  проводили як експериментально, так і за результатами комп'ютерного моделювання за програмою LVM-flow,

адаптованою для течії розплаву алюмінієвого сплаву в НТФ при  $t_{\phi} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Адаптацію програми здійснювали за результатами чотирьох визначень часу  $\tau_s$ , отриманих при використанні реальної форми і її комп'ютерної моделі, схематично представлених на рис. 4.4.

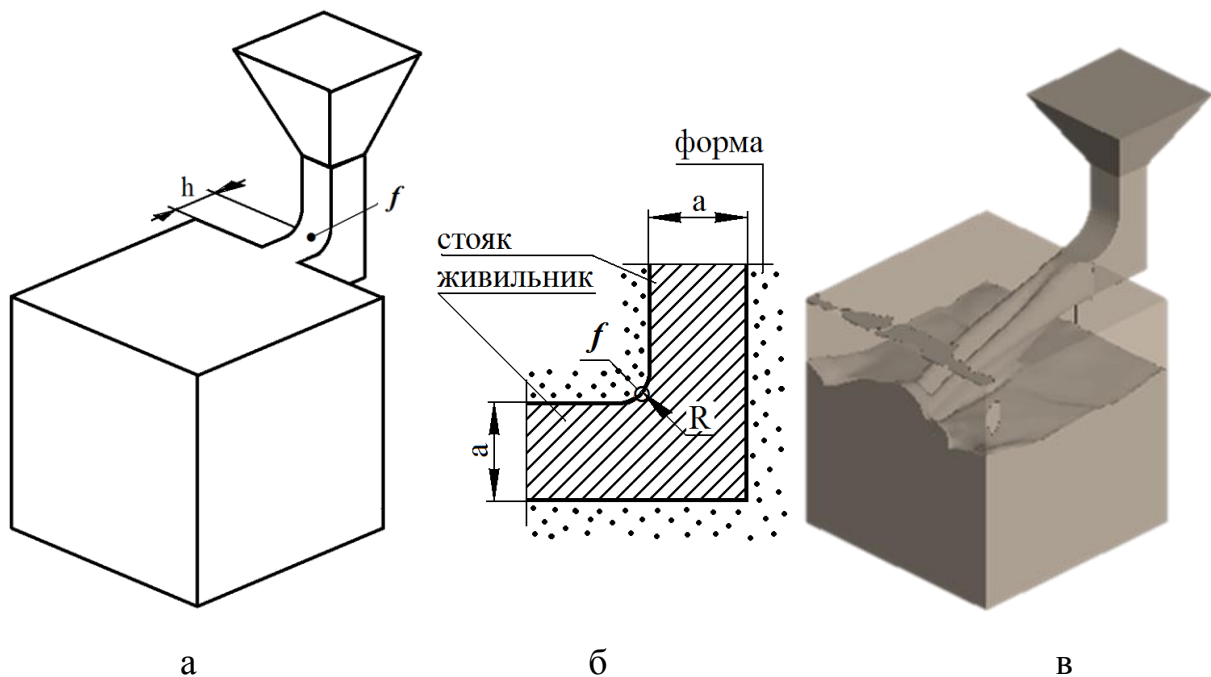


Рисунок 4.4 – Схема виливка і її ливникової системи (а), розташування термопар на галтелі живильника (б), контури виливка і її ливникової системи при комп'ютерному моделюванні процесу заповнення НТФ розплавом (в)

На рис. 4.4. місце установки умовної термопар на комп'ютерній моделі і хромель-алюмелевої термопар в реальних формах позначено літерою  $f$ . Довжина живильника у всіх випадках становила  $h = 50\text{ мм}$ .

Розміри виливка кубічної форми (сторона куба 200 мм) для всіх випадків моделювання були прийняті однаковими. Для експериментальної перевірки даних комп'ютерного моделювання прийняли живильник квадратного поперечного перерізу зі стороною « $a$ » і радіусом галтелі

внутрішнього кута величиною « $R$ » (див. рис. 4.4, б).

Дослідження поводити для алюмінієвого сплаву марки АК5М2 з температурою перегріву розплаву  $\Delta t = 120 \pm 7$  °С при зміні досліджуваних параметрів в наступних межах:

$a$  – від 10 до 21 мм;

$R$  – від 5 до 11 мм;

$w$  – від 100 до 300 мм/с.

За результатами адаптації результатів комп'ютерного моделювання провели уточнення часу існування кірки металу в потоці розплаву на поверхні галтелі ( $\tau_s$ ), а максимально-припустиму масу розплаву, що пройшла через живильник, перерахували з розрахунку даного показника на один погонний сантиметр ширини живильника. Тобто:

$$M_A = \frac{10M}{\tau_s a}. \quad (4.8)$$

Необхідність введення та використання показника  $M_A$  зумовлена тією обставиною, що для реальних виливків можуть бути використані живильники не тільки точкового, але і щілинного типу.

Результати проведених уточнень і розрахунків за формулою (4.8) наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Значення  $\tau_s$  і  $M_A$

п/п	$R$ , мм	$a$ , мм	$w$ , мм/с	$\tau_s$ , с	$M_A$ , кг/(с·см)	код
1	2	3	4	5	6	7
1	5	10,0	100	2,3000	0,027580000	X <sub>1</sub>
2	5	10,0	200	1,6000	0,055160000	
3	5	10,0	300	1,4700	0,082740000	
4	5	17,5	100	9,1360	0,048262857	

продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
5	5	17,5	200	9,0880	0,096514286	
6	5	17,5	300	8,9440	0,144800000	
7	5	21,0	100	9,1944	0,082051441	
8	5	21,0	200	9,1439	0,164187810	
9	5	21,0	300	9,1021	0,246193929	
10	8	10,0	100	4,3510	0,027522936	
11	8	10,0	200	3,8978	0,055269923	
12	8	10,0	300	3,6862	0,082655827	
13	8	17,5	100	15,356	0,048264057	
14	8	15,6	100	14,410	0,081175222	X <sub>13</sub>
15	8	15,6	200	14,600	0,085321222	X <sub>12</sub>
16	8	17,5	200	14,830	0,096527805	
17	8	17,5	300	14,394	0,144798428	
18	8	21,0	100	15,418	0,057903872	
19	8	21,0	200	15,064	0,115854892	
20	8	21,0	300	14,684	0,173762177	
21	9	17,0	133	15,121	0,094856951	X <sub>123</sub>
22	11	10,0	100	7,0703	0,025827815	
23	11	10,0	200	7,0160	0,055128205	
24	11	10,0	300	6,8407	0,082748538	
25	11	17,5	100	22,586	0,048262514	
26	11	17,5	200	22,032	0,096514161	
27	11	17,5	300	21,686	0,144799146	
28	11	21,0	100	22,697	0,057903151	X <sub>3</sub>
29	11	21,0	200	22,374	0,115857266	X <sub>23</sub>
30	11	21,0	300	21,946	0,173764174	X <sub>2</sub>

Використовуючи дані табл. 4.2, побудували залежності  $\tau_s$  і  $M_A$  від параметрів, зазначених в ній і представлених на рис. 4.5...4.7.



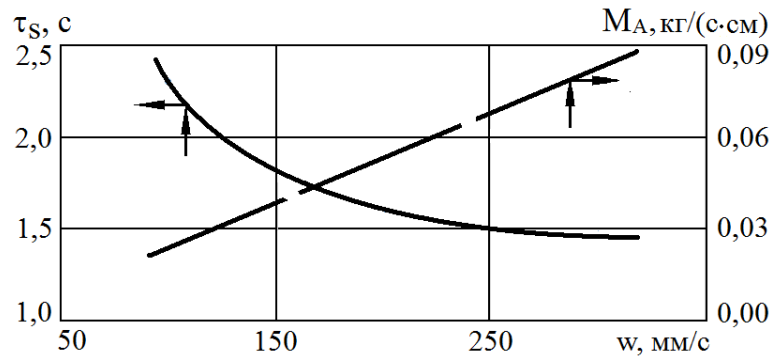


Рисунок 4.5 – Залежність  $\tau_s$  і  $M_A$  від швидкості течії розплаву в живильнику з поперечним перерізом  $10 \times 10$  мм і  $R = 5$  мм

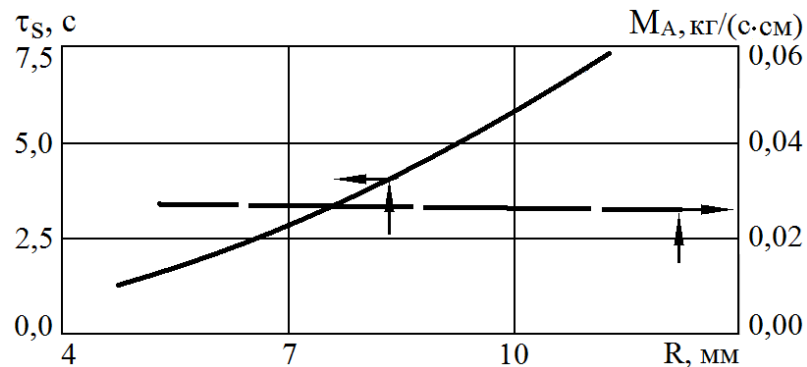


Рисунок 4.6 – Залежність  $\tau_s$  і  $M_A$  від радіуса галтелі при швидкості течії розплаву  $w = 300$  мм/с в живильнику з поперечним перерізом  $10 \times 10$  мм

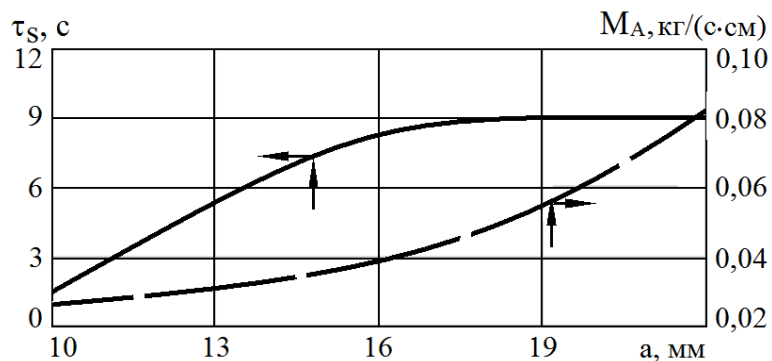


Рисунок 4.7 – Залежність  $\tau_s$  і  $M_A$  від сторони живильника квадратного поперечного перерізу при  $R = 5$  мм і швидкості течії розплаву в живильнику  $w = 300$  мм/с

Відповідно до рис. 4.5...4.7 тривалість існування кірки металу на галтелі живильника зростає з пониженням швидкості течії розплаву в живильнику, а також збільшенням радіуса галтелі і товщини живильника. У той же час, максимально-припустима маса розплаву на його погонний сантиметр, підвищується зі зростанням швидкості течії розплаву в живильнику, товщини живильника і практично не залежить від радіуса галтелі.

Слід зазначити (див. рис. 4.7), що тривалість існування кірки від товщини живильника при незмінному радіусі галтелі і швидкості течії розплаву в живильнику підвищується до певної товщини живильника і надалі, практично, не змінюється. Ця закономірність, мабуть, пояснюється зміною умов теплообміну між потоком розплаву і стінками форми в області галтелі під час заливання форми розплавом.

Використовуючи дані табл. 4.2 (див. в табл. 4.2 присвоєні коди) і метод симплексних решіток Г. Шеффе (див. розділ 2) побудували симплексні решітки для графічного визначення  $M_A$ , радіуса галтелі, товщини живильника (елементи ливникової системи вилівка) і швидкості течії розплаву в живильнику. Симплексна (неповна третя) решітка або симплекс-номограма, і коефіцієнти регресії отриманого рівняння надано на рис. 4.8

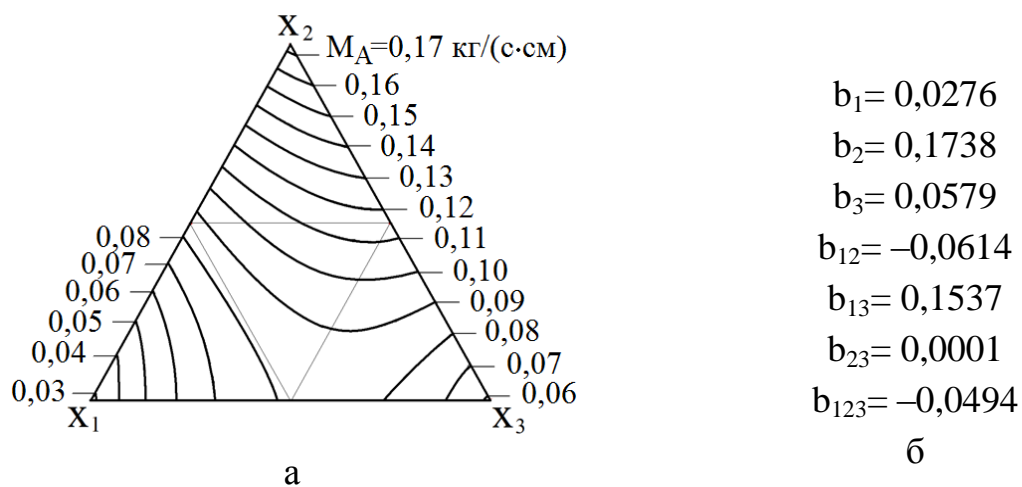


Рисунок 4.8 – Симплекс-номограма (а),  
коефіцієнти регресії рівняння (б)

Використання симплексної решітки (див. рис. 4.8) спільно з формулою (4.4) дозволяє в першому наближенні розрахувати не тільки розміри і кількість живильників, а й час заливки НТФ сплавом на основі алюмінію.

#### 4.2 Передусадкове розширення і лінійна усадка виливків зі сплаву АК5М2 при литті в НТФ

Результати досліджень впливу ПГФ та НТФ при масовій частці води та глини 5% кожного на вільну і утруднену лінійну усадку виливків зі сплаву АК5М2 представлені в табл. 4.3 та на рис. 4.9.

Таблиця 4.3 – Вільна та утруднена лінійна усадка сплаву АК5М2

п/п	Форма	Температура форми, °С	Вільна усадка, %	Утруднена усадка, %
1	ПГФ	+20	1,55	1,11
2		+3	1,71	1,09
3	НТФ	-15	1,98	1,1
4		-20	1,98	1,06
5		-28	1,98	1,05

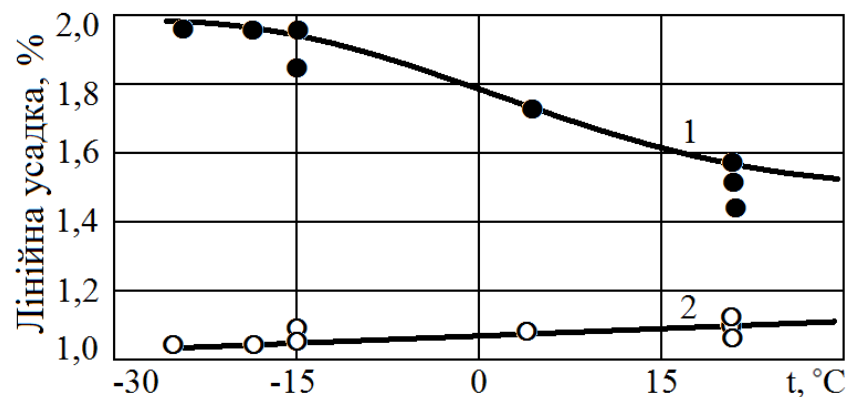


Рисунок 4.9 – Вплив температури форми на лінійну усадку сплаву АК5М2:  
1 – вільна; 2 – утруднена

З аналізу отриманих даних витікає, що зниження температури форми для розробленої НТС призвело до зростання вільної лінійної усадки від 1,55% для форми з температурою  $+20^{\circ}\text{C}$  до 1,98% для форми з температурою  $-28^{\circ}\text{C}$ . У той час як для утрудненої лінійної усадки зниження температури форми призвело до зниження усадки від 1,11% для форми з температурою  $+20^{\circ}\text{C}$  до 1,05% для форми з температурою  $-28^{\circ}\text{C}$ .

Передусадкове розширення сплаву АК5М2 (див. рис. 4.10), при вільній лінійній усадці залежить від температури форми. При цьому зі зниженням температури форми передусадкове розширення зменшується від 0,118% для форми з температурою  $+20^{\circ}\text{C}$  до 0,085% для форми з температурою  $-40^{\circ}\text{C}$ .

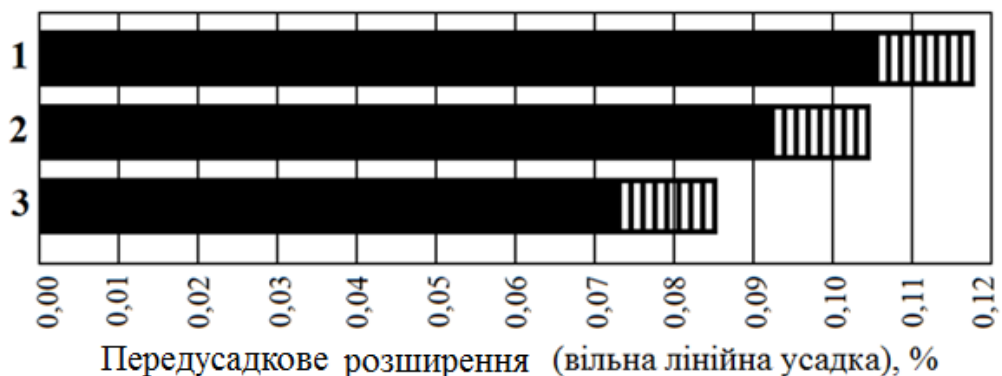


Рисунок 4.10 – Передусадкове розширення при вільній лінійній усадці сплаву АК5М2:

1 – ПГФ ( $+20^{\circ}\text{C}$ ); 2 – НТФ ( $-20^{\circ}\text{C}$ ); 3 – НТФ ( $-40^{\circ}\text{C}$ )

Слід зазначити, що таке збільшення усадки не може бути пояснена тільки придушенням передусадкового розширення (викликаного збільшенням міцності форми), яке становить 0,033% і, вочевидь, пов'язано зі зростанням теплоакумуючої здатності ливарної форми.

Аналіз отриманих результатів дозволяє припустити, що основними чинниками, що впливають на протікання процесів вільної і утрудненої лінійної усадки в НТФ, є жорсткість форми і її теплоакумулююча здатність.

#### 4.3 Вплив технологічних параметрів НТФ на рідиноплинність розплаву АК5М2

Рідиноплинність ливарних сплавів залежить від ряду факторів, які можна розділити на дві групи. З одного боку, фактори, що залежать від властивостей металу, а з іншого – чинники зовнішні по відношенню до металу такі, як газопроникність, вологість форми та ін. Перераховані властивості НТФ відрізняються від показників характерних для традиційних форм, і роблять значний вплив на процеси течії металу в порожнинах ливарної форми. Особливості протікання процесів тепломасопереносу на границі розділу «метал – НТФ» також впливає на цей процес. У зв'язку з цим були проведені дослідження впливу технологічних параметрів НТФ на рідиноплинність сплаву АК5М2. Результати досліджень у порівнянні з ПГФ надані в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Рідиноплинність сплаву АК5М2 в формах різного типу, мм\*

Рідиноплинність , мм	
ПГФ при +20 °С	НТФ при –20 °С
340/405	442/526

Примітка: \* чисельник – рідиноплинність в формі без випару;  
знаменник – рідиноплинність в формі з випаром в кінці каналу

Проведені дослідження дозволили виявити ряд особливостей процесу заповнення НТФ рідким металом. У НТФ без випару при температурі –20 °С спостерігається підвищення на 20% рідиноплинності

розплаву. Така закономірність зумовлена зменшенням опору плинуну металу внаслідок утворення на границі «метал – НТФ» парогазової сорочки і підвищеної газопроникності НТФ.

При заливці розплаву в НТФ з випаром вплив тиску пара в каналі форми повністю усунуто і з пониженням температури форми парогазовий прошарок на межі «метал – НТФ» збільшується. Це можливо пояснити тим, що при глибокому охолодженні формувальної суміші 100-градусна зона розташована ближче до металу і кількість пара, що попадає в контактну зону, збільшується. При цьому, парогазова сорочка знижує силу тертя між розплавом і формою, що призводить до плавного зростання рідиноплинності (рис. 4.11).

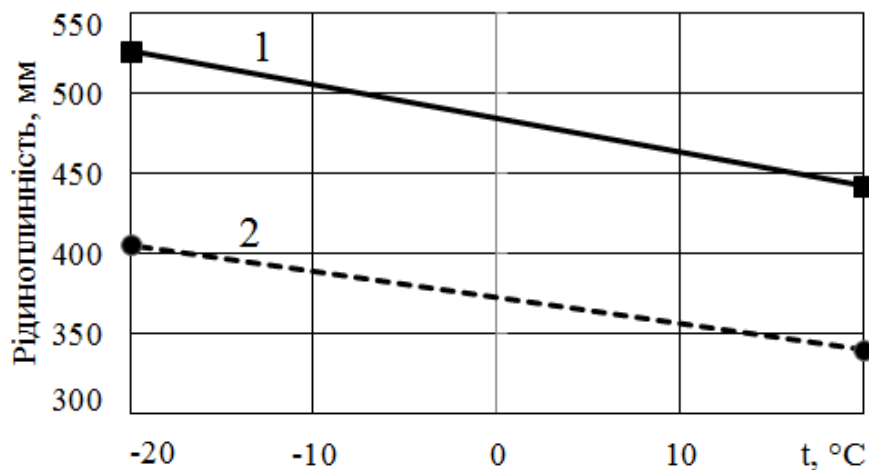


Рисунок 4.11 – Вплив температури форми на рідиноплинність сплаву АК5М2:  
1 – з випаром; 2 – без випару

Слід зазначити, що з пониженням температури форми відмінність між рідиноплинністю металу в формах з випаром і без випару зростає (див. табл. 4.4), що відбувається в результаті більшої зміни газопроникності охолодженої суміші. При вільній вентиляції порожнини ливарної форми

особливості процесів тепломасопереносу на межі розділу «метал – НТФ»сприяють збільшенню рідиноплинності на 25%.

#### 4.4 Вплив НТФ на якість поверхні і точність розмірів виливків зі сплаву АК5М2

Чистота поверхні виливка – це один з показників, що зумовлює його експлуатаційні властивості та надійність [111, 112]. Для оцінки чистоти (шорсткості) поверхні виливків для конкретного виділеного профілю уздовж заданого відрізка використовували такі параметри:

$R_q$  – середньоквадратична шорсткість;

$R_a$  – середнє арифметичне відхилення профілю;

$R_t$  – максимальна висота профілю, максимальна висота від піку до піку западини;

$R_v$  – максимальна глибина западини профілю, найглибша западина (глибина найбільш глибокої западини на профілі шорсткості на довжині оцінки поверхні – трасі).

$R_p$  – максимальна висота піку профілю, найбільш високий пік (висота найбільшого піку на профілі шорсткості на довжині оцінки поверхні – трасі).

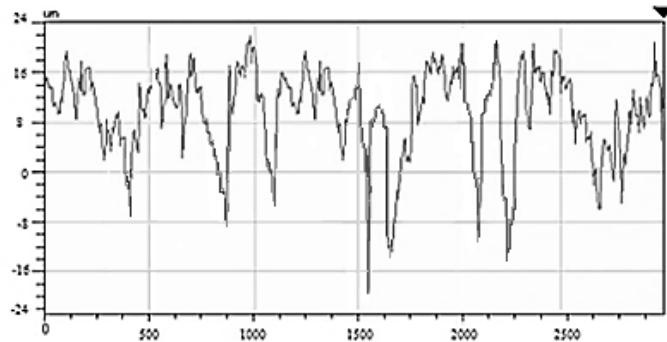
Результати оцінок шорсткості для випадку уздовж лінії для зразків з АК5М2 залитих в НТФ при  $-60$  і  $-20$  °С наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Параметри шорсткості зразків із алюмінієвого сплаву АК5М2, виготовлені в НТФ при  $-60$  і  $-20$  °С

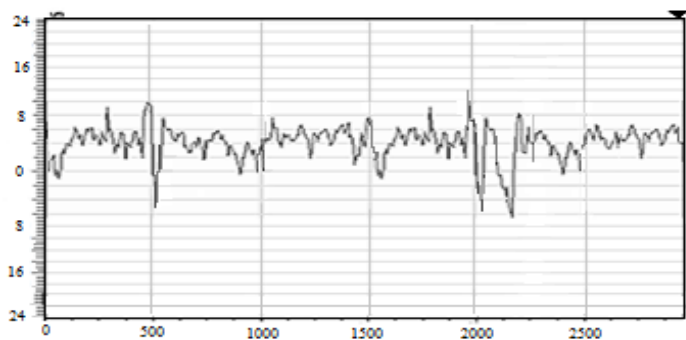
Температура НТФ, °С	$R_q$ , мкм	$R_a$ , мкм	$R_t$ , мкм	$R_v$ , мкм	$R_p$ , мкм
-60	2,60	4,43	4,25	-7,29	9,95
-20	8,02	9,82	35,35	-21,6	21,75

Схематичні зображення шорсткості поверхні випробовуваних зразків

представлені на рис. 4.12.



а



б

Рисунок 4. 12 – Шорсткість поверхні виливка, залитої в НТФ з початковою температурою  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а) і  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)

Встановлено, що виливки, які були залиті в НТФ ( $t_{\phi} = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) мають 5 клас чистоти поверхні, а виливки, які були залиті в НТФ ( $t_{\phi} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – 4 клас чистоти поверхні. Тобто, збільшення початкової температури НТФ призводить до зменшення чистоти поверхні виливків з алюмінієвих сплавів.

З метою проведення порівняльної оцінки впливу типу ливарної форми на точність розмірів виливків з алюмінієвих сплавів використовували вилівок «Диск» зі сплаву АК5М2. В якості контрольного розміру виливка взяли його зовнішній діаметр з номінальною величиною 210 мм. Схема виливка «Диск» з елементами його ливникової системи представлена на рис. 4.13.



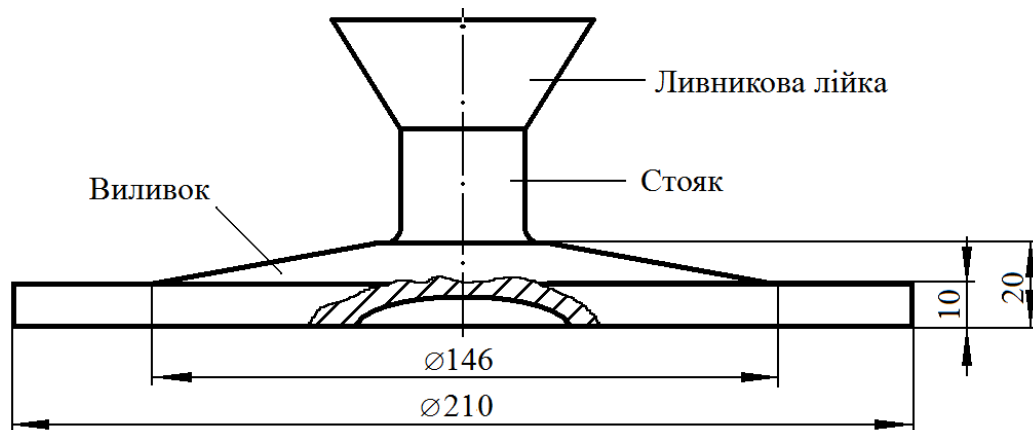


Рисунок 4.13 – Схема виливка «Диск» з елементами ливникової системи

Виливок «Диск» виготовляли з первинного сплаву АК5М2 технічної чистоти, розплав якого для заливки в форми перегрівали на 100...120 °С вище його температури ліквідус. Заливку розплаву проводили в ПГФ, сталевий незабарвлений кокіль і НТФ. У момент заливки температура ПГФ становила + 20 °С, кокілю – від +110 до +170 °С, НТФ – –20 °С. Тривалість охолодження виливків у формах становила 5...7 хвилин. Після досягнення виливками кімнатної температури, проводили вимірювання їх зовнішнього діаметра (на номінальному розмірі 210 мм). Заміри зовнішнього (контрольного) діаметра виконували в трьох незбіжних між собою щодо осі виливка напрямках за допомогою штангенциркуля з похибкою 0,01 мм. Результати вимірювань представлені на рис. 4.14.

Аналіз кривих розподілу на рис. 4.14 показує, що найбільшу розмірну точність виливків забезпечує кокіль (73% виливків з номінальною величиною зовнішнього діаметра), найменшу (7%) – ПГФ.

Ця закономірність пояснюється тим, що кокіль – це жорстка металева форма, при заливці якої теплове розширення і деформація її матеріалу мінімальні. У той же час, при заливанні в ПГФ передусе протяжка моделі і її розштовхування. Як результат, робочі поверхні ПГФ деформуються, що призводить до збільшення зовнішніх розмірів виливків і, відповідно,

зменшення числа виливків з номінальними розмірами. У зв'язку з цим велика частина виливків, виготовлених в ПГФ, має величину зовнішнього діаметру не 210 мм, а від 210,2 до 211,8 мм.

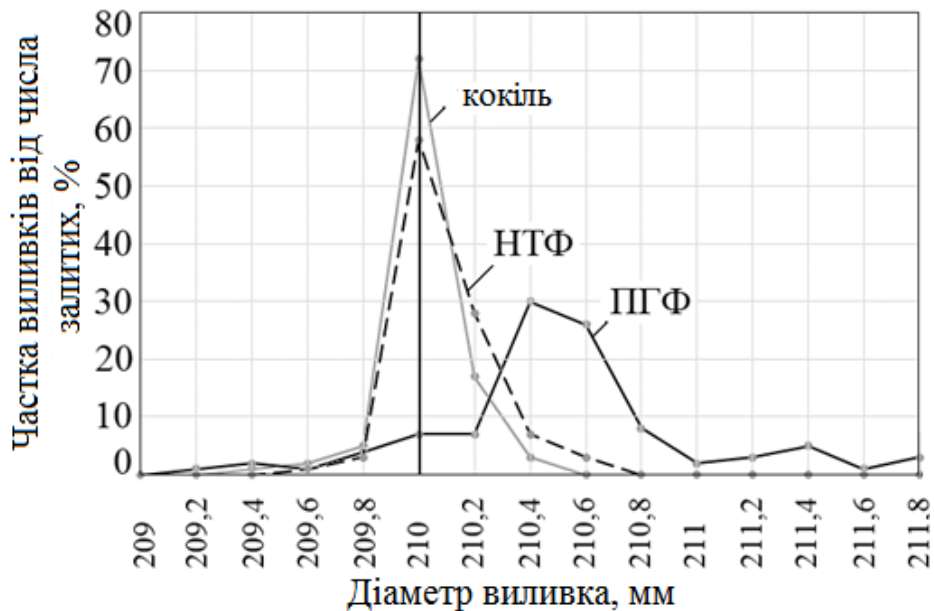


Рисунок 4.14 – Криві розподілу значень величини зовнішнього діаметра (номінальна величина  $\varnothing$  210 мм) виливка «Диск»

Друге місце по розмірній точності (див. рис. 4.14) займають виливки, що виготовлені в НТФ. Міцність, твердість і жорсткість НТФ значно більше, ніж у ПГФ. Внаслідок цього НТФ при протягуванні моделі не деформуються і не вимагають розштовхування. У зв'язку з цим частка виливків, зовнішній діаметр яких відповідає його номінальній величині, становить 58%, що вдвічі вище, ніж у виливків, виготовлених в ПГФ, але на 20% менше, ніж при литті в кокіль.

#### 4.5 Вплив НТФ на мікроструктуру литого сплаву АК5М2

Як і у більшості сплавів структура і щільність виливків з алюмінієвих сплавів залежить від швидкості їх затвердіння [87, 90, 92, 112]. Вплив НТФ

на мікроструктуру литого сплаву АК5М2 оцінювали на литих зразках з розмірами  $\varnothing 15 \times 100$  мм, відлитих в НТФ з різною початковою температурою, ПГФ і сталевий кокіль.

Склад формувальних сумішей НТФ і ПГФ наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Склад сумішей НТФ і ПГФ

Суміш	Вміст, % (за масою)			Початкова температура форми, °С
	Пісок кварцовий	Глина бентонітова	Вода водопровідна	
ПГФ	90	5	5	+20
НТС	90	5	5	-20

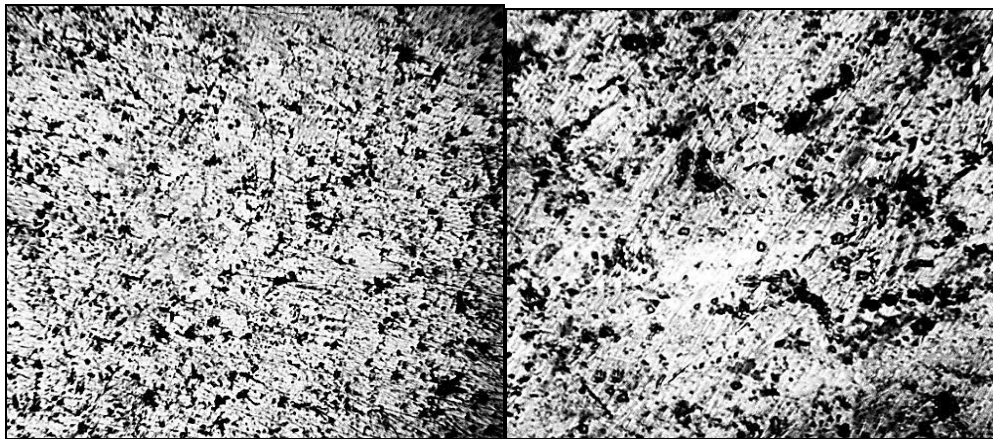
Виплавку сплаву АК5М2 проводили в печі опору в графітовому тиглі металомісткістю (по алюмінію) 1 кг. У якості шихти використовували первинний сплав АК5М2 (ГОСТ 1583-93). Перегрів розплаву при заливці форм з тигля становив  $120 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Поперечну розрізку зразків, що охолодилися до кімнатної температури, для дослідження їх мікроструктури проводили відповідно до рис. 2.7 (див. розділ 2).

Для виявлення фазових складових мікроструктур поверхні досліджуваних шліфів труїли при кімнатній температурі протягом 2 с в 0,01% водному розчині плавикової кислоти. Результати обробки шліфів представлені на рис. 4.15.

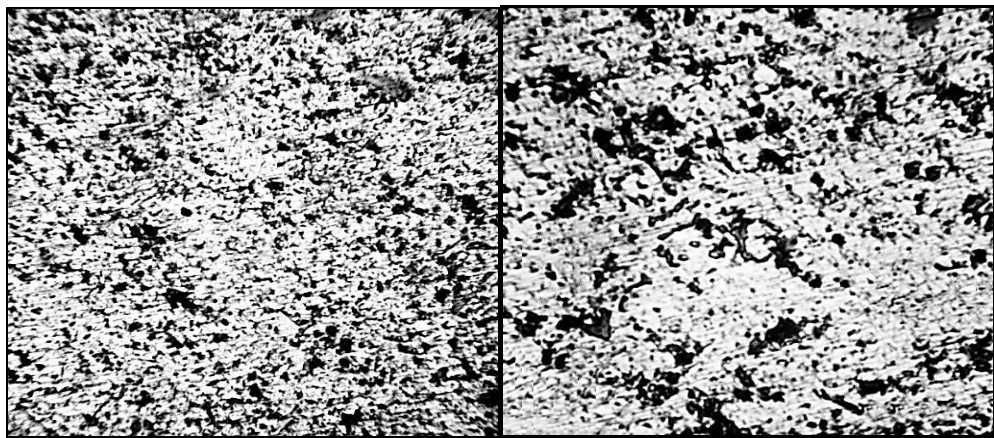
У світлі основних положень теорії А.А. Бочвара, зростання евтектичного зерна в розплаві представляє спільний безперервний розвиток евтектичних фаз, що інтенсивно розгалужуються [69]. При цьому А.А. Бочвар в роботі [70] пропонує три ознаки (послідовності) формування евтектичних структур:

1) одна з фаз веде кристалізацію і створює скелет евтектичних кристалітів, в той час як інша фаза відкладається в міжвісних просторах цього скелета;



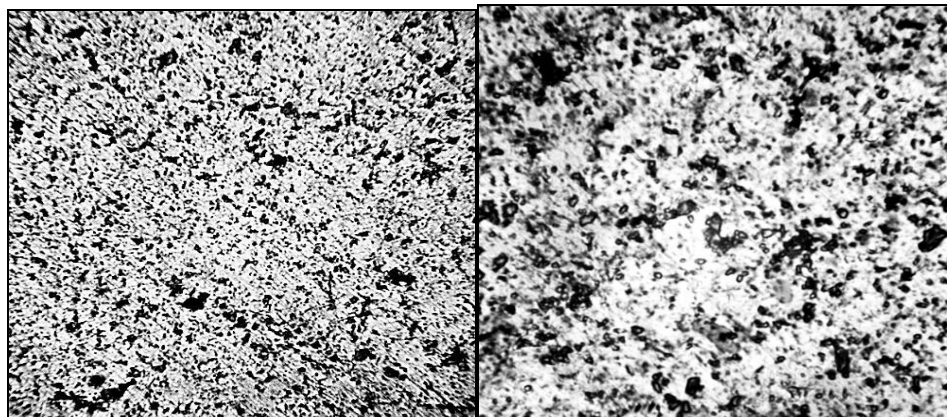
а (×400)

б (×1000)



в (×400)

г (×1000)



д (×400)

е (×1000)

Рисунок 4.15 – Мікроструктури зразків зі сплаву АК5М2,  
відлитих в форми з різних матеріалів:

а, б – НТФ ( $t_{\phi} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); в, г – ПГФ ( $t_{\phi} = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

д, е – кокіль сталевий ( $t_{\phi} = +120\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

2) послідовність виділення на границі кристалізації визначається не числом центрів, а величиною швидкості кристалізації;

3) кристали обох фаз, що зустрілися один з одним, дають ряд відростків по всім напрямках в простір, що і визначає положення нових поверхонь розділу.

Евтектика системи Al-Si відноситься до аномальних. Структури таких евтектик, на прикладі графіто-аустенітних евтектик сірих чавунів ідентифіковані К.П. Буніним, Я.М. Малиночкою, Ю.Н. Тараном [71]. Авторами [71] встановлено, що графіто-аустенітна евтектика формується шляхом зародження і зростання бікрісталітних колоній. Графіт являє собою безперервно розгалужений скелет колоній, укладений в безперервній аустенітній матриці, багатокристалевість якої підтверджується одноманітною кристалографічною орієнтацією окремих її ділянок. Мікроструктура графітної фази представлена у вигляді ізольованих включень, зазвичай хаотично орієнтованих в безперервній матриці твердого розчину [72].

Аналогічно структурно аномальна будова сплавів алюміній-кремній [73] визначається скелетною фазою евтектики, сформованою розгалуженим кристалом кремнію. У між гілками скелета в ході евтектичного розвитку колоній твердне евтектична  $\alpha$ -Al фаза [74].

Сплав АК5М2 по ГОСТ 1583-93 [69] відноситься до ливарних до евтектичних силумінів. У стані після лиття він має структуру первинних кристалів  $\alpha$ -Al (твердий розчин кремнію, магнію і домішок в алюмінії) і евтектичних кристалів кремнію. Первинні кристали  $\alpha$ -Al мають дендритну форму (див. рис. 4.15).

Ділянки  $\alpha$  фази є перетинами гілок дендритів площиною шліфа. Евтектика складається з розчину кремнію і домішок в  $\alpha$ -Al фазі і темних компактних або голчастих кристалів кремнію, які є поперечними або поздовжніми перерізами площиною шліфа розгалужених кристалів кремнію в евтектичних колоніях.

Внаслідок того, що на шліфі колоніальна будова евтектики зазвичай не виявляється (див. рис. 4.15), візуальна презентація такої структури часто називається «аномальна евтектика» [76, 77].

Тому, з урахуванням розглянутого вище структуроутворення доевтектичних силумінів, кількісному аналізу піддавали процентний вміст в структурі темної ( $\beta$ -Si) фази, яке склало у зразків, виготовлених в:

- НТФ з початковою температурою  $t_{\phi} = -20^{\circ}\text{C}$  – 18,7...19,3%;
- ПГФ з початковою температурою  $t_{\phi} = +20^{\circ}\text{C}$  – 20,9...22,1%;
- кокіль сталевий з початковою температурою  $t_{\phi} = +120^{\circ}\text{C}$  – 28,0...29,9%.

Виходячи з аналізу отриманих результатів можна казати, що, очевидно, світлі ділянки структури являють собою первинні кристали  $\alpha$ -Al, що нашарувалися на них  $\alpha$ -Al фазою евтектичного походження. Темні ділянки – перетини евтектичних кристалів  $\beta$ -Si.

Кількісні дані про вміст у структурі сплаву кристалів  $\beta$ -Si свідчать про те, що в кокілі зразки алюмінієвого сплаву АК5М2 тверділи з найбільшою швидкістю. При цьому, швидкість затвердіння зразків в ПГФ і НТФ з початковою температурою  $t_{\phi} = -20^{\circ}\text{C}$  практично однакова, що узгоджується з даними робіт [62, 110]. Слід зазначити, що така закономірність характерна для виливків з тонкими стінками. У виливках з більшою товщиною стінки (>30 мм) швидкість затвердіння збільшується з пониженням початкової температури форми та збільшенням її теплоакумуючої здатності, що зумовлено особливостями тепломасопереносу у НТФ [83, 87, 110].

Причиною такої закономірності є те, що при литті в НТФ і ПГФ між металом вилівка і поверхнею форми, мабуть, відносно швидко утворюється паровий прошарок, що різко знижує теплопередачу від вилівка в форму.

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 наведені в табл. 4.7 та на рис. 4.16.

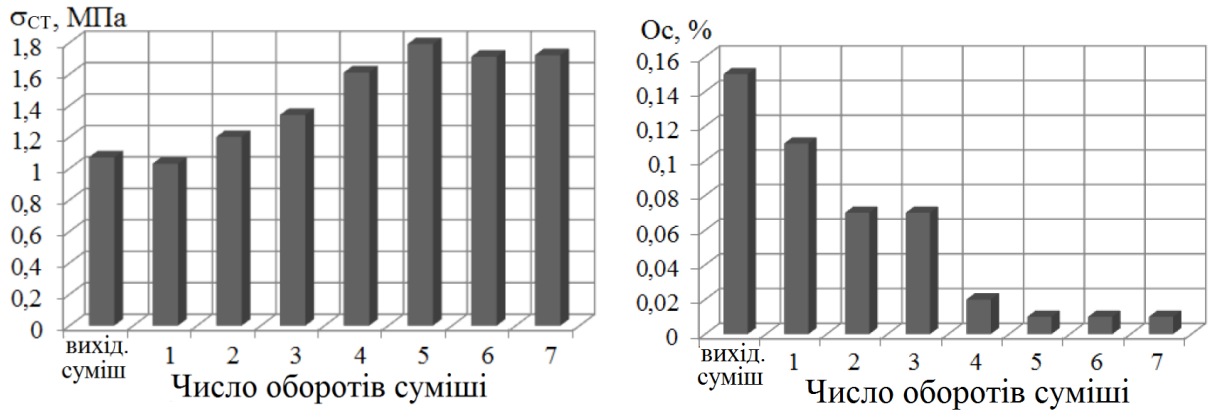
Таблиця 4.7 – Властивості НТС оптимізованого складу після 7 оборотів використання

Вихідна суміш	Властивості НТС		
	$\sigma_{CT}$ , МПа	Ос, %	Г, од
Число оборотів НТС	1,07	0,141	97
1	0,95	0,115	96
2	1,17	0,066	93
3	1,31	0,067	104
4	1,58	0,018	101
5	1,78	0,01	103
6	1,67	0,012	112
7	1,67	0,012	106

У процесі використання НТС при заливці відбувається нагрів частини суміші, навколо виливка. При цьому частина води з шарів, прилеглих до виливка, випаровується і конденсується в більш глибокі шари форми. У більш глибоких частинах форми – тане лід і вода нагрівається до різної температури, а в далеких шарах лід тане тільки при охолодженні виливка на повітрі.

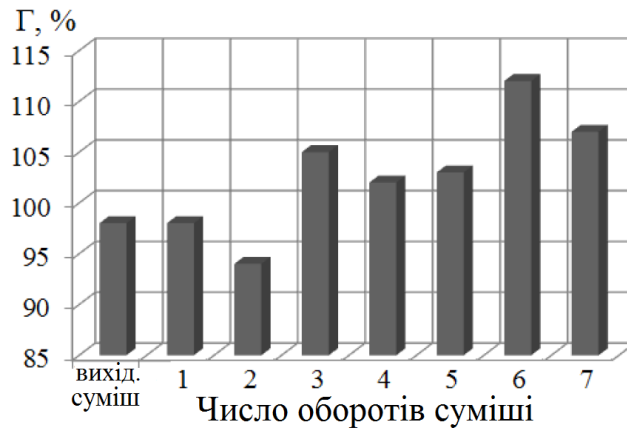
Будь-який нагрів вихідної води до температури понад 20 градусів, в тому числі і після її конденсації з утворенням пару, в тому числі і після первинної заморозки, призводить до зниження розчинених у воді газів. З цього витікає, що зі збільшенням оборотів використання суміші, об'єм води в НТФ, котрий зазнав будь-якого нагріву, буде в НТФ зростати. В свою чергу це приводить до загальному зниженню розчинених у воді газів і, відповідно,

підвищенню міцності суміші, зниження її обсіпальності та збільшення газопроникності. Крім цього, зі збільшенням оборотів використання НТС буде збільшуватися тривалість контакту води з глиною, що вже через 24 години також сприятиме підвищенню міцності суміші.



а

б



в

Рисунок 4.16 – Властивості НТС оптимізованого складу після її контакту з розплавом алюмінієвого сплаву АК5М2:  
а – міцність на стиск; б – обсіпальність; в – газопроникність



З отриманих даних видно, що зі збільшенням застосування оборотної суміші властивості НТС покращуються при підтримуванні відповідного рівня вологості суміші.

#### 4.6 Результати випробування технології лиття в НТФ алюмінієвих сплавів в промислових умовах

Технологію отримання виливків в НТФ з суміші оптимізованого складу і методику розрахунку параметрів ливникової системи випробували в умовах ливарного цеху при виготовленні виливка-представника «Кришка». Спрощена схема технології виливка наведена на рис. 4.17.

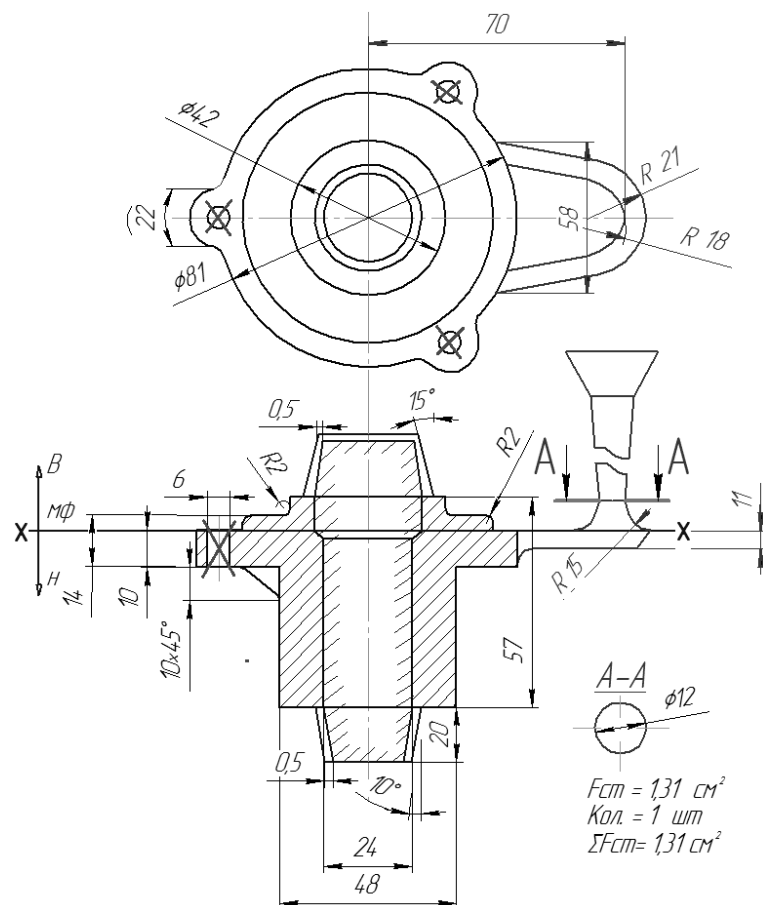


Рисунок 4.17 – Спрощена схема технології виливка «Кришка»

Виливок «Кришка» відноситься до литва першої групи складності і конструктивно являє собою виріб у вигляді порожнього циліндра з фланцем на одному з її торців.

Матеріал вилівка – сплав АК5М2, маса вилівка – 0,22 кг.

Перевірку проводили в ливарному цеху ДП «Центр литва під тиском» (м. Одеса), де виготовили дослідно-промислову партію вилівоків «Кришка». При цьому, частина вилівоків (35 шт) з числа вилівоків дослідно-промислової партії виготовляли в зимовий період (температура повітря в цеху – від +10 до +12 °С), іншу частину (35 шт) – в літній період (температура повітря в цеху – від +25 до +34 °С).

Виходячи з дрібносерійного характеру випуску і відсутності постійної потреби, дані вилівки виготовляли в опоці по чотирьом моделям з індивідуальною ливниковою системою, які були виготовлені з алюмінієвого сплаву і розміщені відповідним чином на чавунних підмодельних плитах.

Формувальну суміш готували наступним чином:

- навішення піску масою  $90 \pm 0,1$  кг засипали в лопатковий змішувач;
- включали змішувач і вводили в його робочий простір навішення бентонітової глини ( $5 \pm 0,01$  кг);
- перемішування компонентів в змішувачі проводили протягом  $11 \pm 1$  хв;
- вводили в змішувач навішення водопровідної води ( $5 \pm 0,01$  кг);
- перемішування компонентів в змішувачі проводили протягом  $20 \pm 1$  хв;
- вивантажували приготовлену суміш в короб і накривали її вологою джутовою мішковиною.

Для формування (верхньої і нижньої полуформ):

- модель вилівка з елементами ливникової системи встановлювали на напрямні підмодельні плити і встановлювали опоку;
- робочий простір опоки заповнювали приготовленою сумішшю;
- вручну ущільнювали формувальну суміш в опоки;
- за допомогою куточка видаляли надлишок суміші в опоці;

– опоку на підмодельній плиті (не проводячи протягання моделі) на 40...45 хв поміщали в холодильну камеру з температурою  $-20 \pm 1$  °С.

Після 40...45 хв опоки на підмодельних плитах витягували з холодильної камери, знімали з під модельної плити і спарювали по напрямних штирям, скріплювали між собою скобами і протягом 3...5 хв з моменту вилучення з холодильної камери подавали на заливку.

Виплавку сплаву АК5М2 проводили в печі опору, оснащеної чавунним тиглем. Температура розплаву в печі становила 720...730 °С. Сплав рафінували хлористим цинком з розрахунку 0,1% хлористого цинку від маси шихти в тиглі. Для оцінки впливу швидкості заливки на якість деякі виливки залили зі зниженою питомою швидкістю надходження розплаву в форму. Для порівняльного аналізу, одночасно з НТФ заливали виливки в ПГФ.

Після закінчення вибивання проводили оцінку якості виливків зовнішнім оглядом. У числі контрольованих поверхонь візуальною оцінкою були піддані поверхні галтелі в переході від стояка до живильника на предмет розмиття НТФ. В якості інструментально контрольованих розмірів для проведення оцінки відхилень розмірів прийнятого виливка-представника були (див. рис. 4.17):  $D_1 - \text{Ø } 81$  мм;  $D_2 - \text{Ø } 48$  мм;  $D_3 - \text{Ø } 24$  мм;  $H - 57$  мм.

Виливки «Кришка» зі сплаву АК5М2, залиті в НТФ при  $-20$  °С, зі зниженою і оптимальною питомою швидкістю заливки форми, представлені на рис. 4.18.

Аналіз зовнішнього вигляду виливків на рис. 4.18 показує, що при литті в НТФ, як і при литті в інші види форм, порушення режиму заливки розплаву в формі призводить до появи на виливках дефектів, в даному випадку – спаїв, хвилястості поверхні, недоливів. При цьому, в виливках, що повільно заливаються, відбулося розмиття НТФ в області галтелі і поява невеликих засмічень в області фланця.

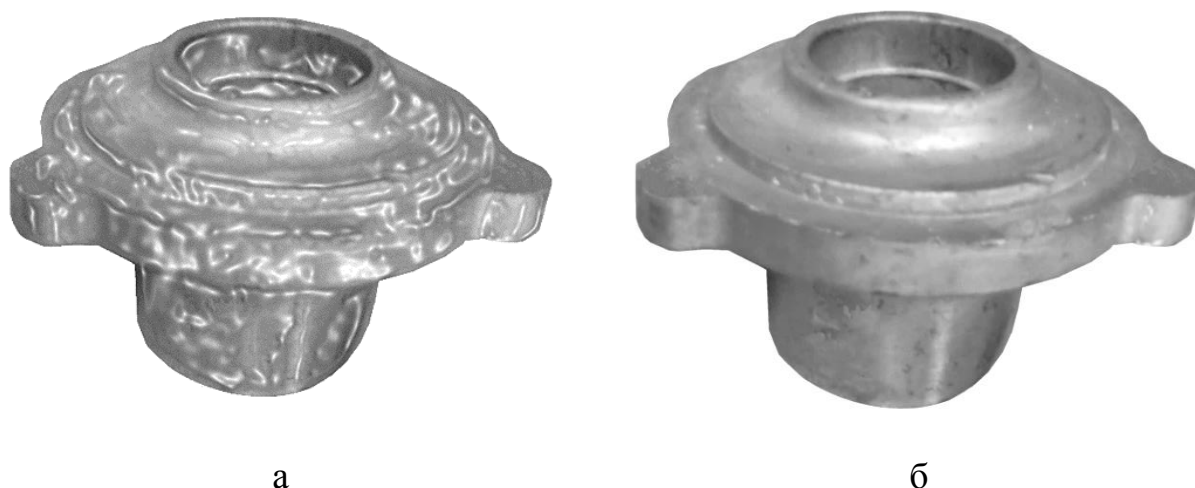


Рисунок 4.18 – Виливок «Кришка» зі сплаву АК5М2, що залиті в НТФ зі зниженою ( а ) і оптимальною ( б ) питомою швидкістю заливки форми

Встановлено, що всі виливки, отримані відповідно до розробленої технології виготовлення НТФ, мали гладку поверхню і характеризувалися відсутністю ужимин, гарячих тріщин, раковин, засмічень, пригару і видимої неозброєним оком хвилястості поверхні.

Виготовлені виливки-представники пройшли всі види контролю якості, передбачені технологічним процесом цеху, визнані придатними і передані в механічний цех для подальшої механічної обробки. Результати оцінки якості дослідно-промислової партії виливків свідчать про те, що всі виливки за параметрами точності повністю відповідають вимогам нормативно-технічної документації.

Результати проведених вимірювань розмірів виливків, виготовлених в НТФ і ПГФ, представлені на рис. 4.19 у вигляді гістограм відхилень розмірів  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  і  $H$  від їх номінальних значень. Для побудови гістограм використовували дані про середні значення чотирьох вимірів кожного виливка з партій чисельністю по 70 штук.

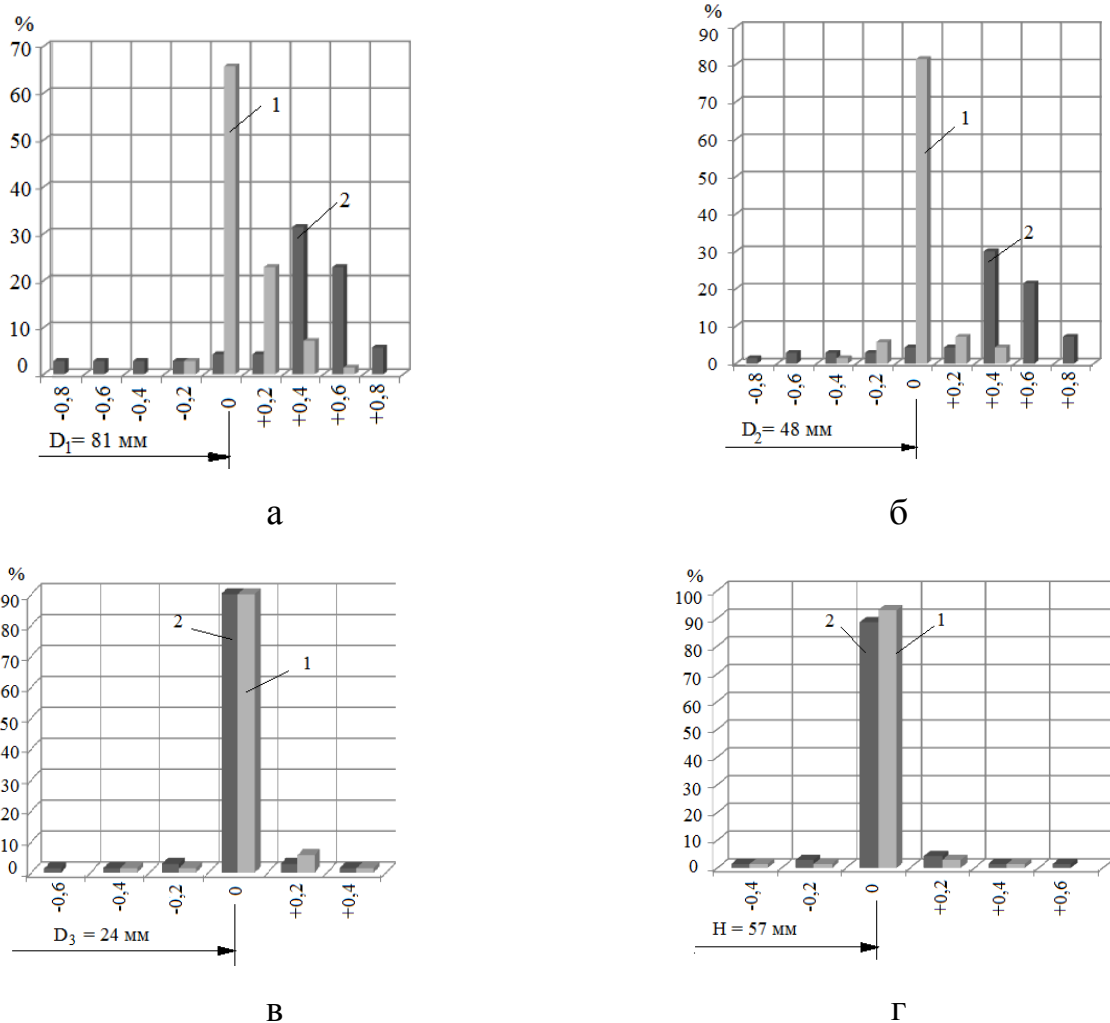


Рисунок 4.19 – Гістограми розподілу відхилень розмірів  $D_1$  (а),  $D_2$  (б),  $D_3$  (в) і  $H$  (г) вилівка «Кришка» від його номінального значення при виготовленні в НТФ  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (1) і ПГФ (2)

Аналіз гістограм на рис. 4.19 показує, що в порівнянні з аналогічними вилівками, виготовленими в ПГФ, у вилівоків, виготовлених в НТФ, не тільки стабілізувалася, але і підвищилася розмірна точність за розмірами  $D$  і  $H$ . При цьому величина еліпсності за розміром  $D$  у вилівоків, виготовлених в НТФ, не перевищувала  $0,2\text{ mm}$ , а інтервал його зміни склав  $0,6\text{ mm}$ , в той час як у вилівоків, виготовлених в ПГФ, еліпсність досягала  $0,12\text{ mm}$ , а інтервал зміни розміру діаметра –  $0,35\text{ mm}$ .

Результати замірів  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  і  $H$  контрольної групи (70 шт) виливків-представників «Кришка», залитих в НТФ наведені в табл. 4.8, залитих в ПГФ – в табл. 4.9.

Таблиця 4.8 – Розміри  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  і  $H$  (номінальні величини  $\varnothing 81$ мм,  $\varnothing 48$  мм,  $\varnothing 24$  мм і  $h 57$  мм) виливка «Кришка» при виготовленні в НТФ  $-20$  °С

$D_1$ , мм	Виливків, що виготовлені в НТФ		$D_2$ , мм	Виливків, що виготовлені в НТФ	
	штук	% (від загального числа)		штук	% (від загального числа)
80,80	2	2,86	47,60	1	1,43
81,00	46	65,71	47,80	4	5,71
81,20	16	22,86	48,00	57	81,43
81,40	5	7,14	48,20	5	7,14
81,60	1	1,43	48,40	3	4,29
$D_3$ , мм	Виливків, що виготовлені в НТФ		$H$ , мм	Виливків, що виготовлені в НТФ	
	штук	% (від загального числа)		штук	% (від загального числа)
23,60	1	1,43	56,60	1	1,43
23,80	1	1,43	56,80	1	1,43
24,00	63	90,00	57,00	65	92,85
24,20	4	5,71	57,20	2	2,86
24,40	1	1,43	57,40	1	1,43

Таблиця 4.9 – Розміри  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  і  $H$  (номінальні величини  $\varnothing 81$  мм,  $\varnothing 48$  мм,  $\varnothing 24$  мм і  $h 57$  мм) виливка-представника «Кришка» виготовленого в ПГФ

$D_1$ , мм	Виливків, що виготовлені в ПГФ		$D_2$ , мм	Виливків, що виготовлені в ПГФ	
	штук	% (від загального числа)		штук	% (від загального числа)
1	2	3	4	5	6
80,00	1	1,43	47,00	1	1,43
80,20	2	2,86	47,20	1	1,43
80,40	2	2,86	47,40	2	2,86
80,60	2	2,86	47,60	2	2,86
80,80	2	2,86	47,80	2	2,86
81,00	3	4,28	48,00	3	4,28
81,20	3	4,28	48,20	3	4,28
81,40	22	31,44	48,40	21	30,01
81,60	16	22,86	48,60	15	21,43
81,80	4	5,71	48,80	5	7,14
82,00	4	5,71	49,00	5	7,14
82,20	3	4,28	49,20	4	5,71
82,40	3	4,28	49,40	3	4,28
82,60	2	2,86	49,60	2	2,86
82,80	1	1,43	49,80	1	1,43
$D_3$ , мм	Виливків, що виготовлені в ПГФ		$H$ , мм	Виливків, що виготовлені в ПГФ	
	штук	% (від загального числа)		штук	% (від загального числа)

продовження табл. 4.9

1	2	3	4	5	6
23,40	1	1,43	56,60	1	1,43
23,60	1	1,43	56,80	2	2,86
23,80	2	2,85	57,00	62	88,58
24,00	63	90,00	57,20	3	4,27
24,20	2	2,86	57,40	1	1,43
24,40	1	1,43	57,60	1	1,43

Аналіз параметрів точності виливків-представників, виготовлених в НТФ, показав, що в порівнянні з аналогічними виливками, виготовленими в ПГФ, у виливків-представників промислової партії підвищилась точність розмірів і форми. Номінальний розмір  $D_1$  виливка залитого в НТФ підвищився на 60%, в порівнянні з ПГФ. Це пов'язано з тим, що при добуванні моделі з ПГФ відбувається розштовхування моделі, форма деформується і номінальний розмір збільшується. У той час як у НТФ модель заморожується разом з формою і витяг моделі відбувається після заморожування. НТФ має велику жорсткість і міцність, тому деформація мінімальна. Номінальний розмір  $D_2$  виливка залитого в НТФ підвищився на 75%, в порівнянні з ПГФ. Номінальний розмір  $D_3$  виливків, отриманих в НТФ і ПГФ, однаковий, тому що внутрішній отвір жорстко закріплено стрижнем, що попереджує деформацію. Номінальний розмір по висоті  $H$  виливків, отриманих в НТФ, збільшився на 4% в порівнянні з ПГФ.

Слід зазначити, що для НТФ, як і для інших способів виготовлення форм, притаманні деякі недоліки, які зумовлюють область їх застосування. Зокрема, в ливарних цехах України поширюється використання процесу ВПФ та способів імпульсного ущільнення формувальних сумішей. За результатами аналітичних досліджень встановлено, що для ВПФ мінімально припустиме розрідження в



формі (один з основних параметрів технології ВПФ) для якої застосована опока периметром  $\Pi$  та площею  $S$  повинно бути [113]:

$$\Delta p_{\min} = \frac{\gamma(g+a) S}{\xi \cdot f \Pi} \quad (4.9)$$

де  $\gamma$  – щільність піску;

$g, a$  – прискорення, відповідно, вільного падіння та напівформи від дії сил інерції;

$\xi$  – коефіцієнт бокового тиску;

$f$  – коефіцієнт зовнішнього тертя піску.

Основним показником якості для імпульсних методів ущільнення формувальних сумішей є їх відносна об'ємна деформація яку можливо розрахувати за формулою [99]:

$$\varepsilon = \frac{1}{t_i} \sqrt{\frac{M_0}{3K}} \sin \sqrt{\frac{3K}{M_0}} t, \quad (4.10)$$

де  $M_0$  – маса суміші;

$t_i$  – тривалість імпульсу;

$K$  – модуль жорсткості.

З аналізу формул (4.9) та (4.10) витікає, що якість таких форм залежить від значного числа факторів, які змінюються вже у межах одного виливка. Тобто, використання таких способів формування, не зважаючи на їх економічність та високий ступінь механізації, не гарантує отримання абсолютно якісного лиття про що свідчить, наприклад, робота [113].

У той же час, у порівнянні з цими відносно новими способами формоутворення, якість заморожених форм менш залежна від технологічних факторів їх виготовлення, що є показником забезпечення стабільної якості виливків, які в них виготовляють.

#### 4.7 Висновки

1. Перебіг розплаву алюмінієвого сплаву по каналах в НТФ супроводжується не тільки його пристінковим затвердінням (появою кірки сплаву) тривалість існування якої на галтелі живильника зростає з пониженням швидкості течії розплаву в живильнику, а також 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 і практично не залежить від радіуса галтелі.

2. При зниженні початкової температури форми передусадкове розширення при вільній лінійній усадці зменшується від 0,118% до 0,085%.

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

4. Зниження температури форми НТФ до  $-20$  °C призводить до зростання вільної лінійної усадки (1,55...1,98%). У той же час, утруднена лінійна усадка зменшується (1,11...1,05%). Тобто основними чинниками, що впливають на протікання процесів вільної і утрудненої лінійної усадки в НТФ є жорсткість форми і її теплоакumuлююча здатність.

5. Рідиноплинність алюмінієвого сплаву АК5М2 як при заливанні з випаром так и без випару підвищується на 20...25% зі зниженням початкової температури форми від  $+20$  до  $-20$  °C.

6. Зі зниженням початкової температури форми 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  $-60$  °C.

7. Застосування НТФ дозволяє підвищити розмірну точність виливків з алюмінієвих сплавів в порівнянні з виливками, отриманими в ПГФ, і

наблизити її до рівня розмірної точності лиття в кокіль.

8. При литті в кокіль швидкість затвердіння виливків найбільша, в НТФ з початковою температурою  $t_{\phi} = -20$  °С – з найменшою, швидкість затвердіння виливків в ПГФ і НТФ з початковою температурою  $t_{\phi} = -60$  °С практично однакова. Отримані результати свідчать про те, що при литті алюмінієвих сплавів доцільно використовувати НТФ з найбільш низькою початковою температурою.

9. За результатами оцінки якості лиття в НТФ встановлено, що в порівнянні з аналогічними виливками, виготовленими в ПГФ, у виливків-представників промислової партії підвищилась точність розмірів і форми на 60...75%.

## ЗАГАЛЬНІ 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 и стрижнів, поліпшенням 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 параметрів 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 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>016 Вільногірського родовища (Україна) і води для виготовлення НТФ непридатні в зв'язку з їх неприпустимою обсипальністю.

5. Для підвищення міцності і зниження обсипальності для виробництва НТФ слід використовувати суміш піску марки 1К<sub>3</sub>О<sub>3</sub>016 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 обсипальність НТФ. Найбільшу міцність та найменшу обсипальність має суміш піску з 5% кип'яченої води і з 5% набряклої бентонітової глини. Трохи нижче аналогічні показники у сумішей з ненабряклими глинами та газовано СО<sub>2</sub> водою. Середню міцність і одну з найменших обсипальностей 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°C 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 жорсткість поверхні виливків зі сплаву АК5М2 знижується, тобто підвищується клас чистоти їх поверхні від 4-го класу при початковій температурі НТФ -20 °С до 5-го класу при початковій температурі НТФ -60 °С.

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» (див. Додаток Б).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пат. 2449854 РФ, МПК В22С1/18 (2012.05). Способ получения связующего материала для изготовления литейных форм / Кидалов Н.А., Радченко Ф.С., Закутаев В.А. и др. – № 2011100595/02, заявл. 11.01.2011; опубл. 10.05.2012. – Бюл. № 13.
2. Пат. 2102180 РФ, МПК В22С1/16, В22С1/18 (1998.01). Способ получения связующего материала на основе гидроксохлоридов алюминия / Куценко С.А., Неженцев В.Ю., Пилюзин В.И. и др. – № 2011100595/02, заявл. 11.01.2011; опубл. 10.05.2012. – Бюл. № 13
3. Формовочные материалы и технология литейной формы: Справочник / [С.С. Жуковский, Г.Л. Анисимович, Н.И. Давыдов и др.] // Под общей ред. С.С. Жуковского. – М.: Машиностроение, 1993.– 222 с.
4. Пат. 2292981 РФ, МПК В22С1/16 (2007.02). Смесь для изготовления литейных стержней / Якимов В.И., Петров В.В., Дмитриев Э.А. и др. – № 2005103042/02, заявл. 02.07.2005; опубл. 10.02.2007. – Бюл. № 4.
5. Пат. 2167021 РФ, МПК В22С1/00. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / В.В. Спасский, В.А. Дурнев, Н.В. Кистенева и др. Заявлено 17.06.1997. Опубликовано 10.06.1999.
6. Пат. 2292980 РФ, МПК В22С1/16 (2007.02). Смесь для изготовления литейных форм и стержней / Якимов В.И., Петров В.В., Дмитриев Э.А. и др. – № 2004137563/02, заявл. 10.06.2006; опубл. 10.02.2007. – Бюл. № 4.
7. А.С. 1369848 СССР, МКИ В22С1/18. Смесь для изготовления форм и стержней / И.А. Микей, С.А. Флейтман, О.И. Смолькова и др. – № 4037042/23-02; заявл. 11.03.1986; опубл. 30.01.1988. – Бюл. № 4.
8. Пат. 2224619 РФ, МПК В22С1/18 (2004.02). Смесь для изготовления литейных форм и стержней / Королев А.В., Евлампиев А.А., Шведов М.А. – № 2002120026/02, заявл. 22.07.2002; опубл. 27.02.2004. – Бюл. № 5.

9. Пат. 2405648 РФ, МПК В22С1/18 (2010.12). Смесь для изготовления литейных форм и стержней / Леушин И.О., Маслов К.А. – № 2009131773/02, заявл. 21.08.2009; опубл. 10.12.2010. – Бюл. № 34.

10. Илларионов И.Е. Формовочные материалы и смеси / И.Е. Илларионов, Ю.П. Васин. – Чебоксары: Изд-во при Чуваш. ун-те, 1995. Ч. 2. – 288 с.

11. Пат. 2298449 РФ, МПК В22С1/18 (2007.05). Легковыбиваемая жидкостекольная смесь и способ ее приготовления / Евстигнеев А.И, Петров В.В., Дмитриев Э.А. и др. – № 2005118912/02, заявл. 17.06.2005; опубл. 10.05.2007. – Бюл. № 19.

12. Голотенков О.Н. Формовочные материалы / О.Н. Голотенков. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 164 с.

13. Пат. 2486987 РФ, МПК В22С1/18 (2013.07). Способ изготовления комбинированных литейных форм из жидкостекольных самотвердеющих смесей / Ромашкин В.Н., Степашкин Ю.А., Нуралиев Ф.А. и др. – № 2010153996/02, заявл. 29.12.2010; опубл. 10.07.2013. – Бюл. № 19.

14. Лясс А.М. Вопросы теории литейных процессов / А.М. Лясс. – М.: Машгиз, 1960. – 255 с.

15. Лясс А.М. Быстротвердеющие формовочные смеси / А.М. Лясс. – М.: Машиностроение, 1965. – 322 с.

16. Пат. 2354489 РФ, МПК В22С1/18 (2009.05). Холоднотвердеющая смесь для изготовления литейных форм и стержней / Махлай В.Н., Афанасьев С.В., Рощенко О.С. и др. – № 2007127234/02, заявл. 16.07.2007; опубл. 10.05.2009. – Бюл. № 13.

17. Пат. 2187405 РФ, МПК В22С1/16 (2002.08). Холоднотвердеющая смесь для изготовления литейных форм и стержней / Махлай В.Н., Афанасьев С.В., Барышева М.А. и др. – № 2000127346/02, заявл. 01.11.200; опубл. 20.08.2002. – Бюл. № 15.

18. Пат. 2241571 РФ, МПК В22С1/16 (2005.03). Суспензия для изготовления керамических форм / Елисеев Ю.С., Поклад В.А., Оспенникова



О.Г.и др. – № 2005108433/02, заявл. 25. 03.2005; опубл. 20.09.2006. – Бюл. № 26.

19. Юсфин Ю.С. Экология литейного производства: учеб. пособие для вузов / [Ю.С. Юсфин, А.Н. Болдин, С.С. Жуковский и др.]// под ред. А.Н. Болдина, С.С. Жуковского, А.Н. Поддубного, А.И. Яковлева, В.Л. Крохотина – Брянск: БГТУ, 2001. – 315 с.

20. Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям / В.С. Шуляк. – Санкт-Петербург: НПО «Профессионал», 2007. – 408 с.

21. E. Matsumura, A. Voshiba, S. Onazawa, Umono, J. Jap. Foundrymen's Soc. 1972. – Vol. 44, N 11. – P. 366-637.

22. Илларионов И.Е. Жидкостекольные смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом / И.Е. Илларионов, Н.В. Петрова // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2011. – №2. – С. 208–213.

23. Иванова Л.А. Снижение загазованности среды при литье по газифицируемым моделям / Л.А. Иванова, Л.В. Прокопович, И.В. Прокопович // Материалы конференции «Пути повышения качества и экономичности литейных процессов». – Одесса: Совпин, 1995. –С. 18.

24. Иванова Л.А. Биологическая детоксикация продуктов деструкции пенополистироловой модели / Л.А. Иванова, Л.В. Прокопович // Охрана окружающей среды. – Черкасы. – Вып. 2. -1995. –С. 3-5.

25. Газожидкостная хроматография / Пер. с англ. под ред. А.Г. Панкова. Вып. 2. –М.: НИИТЭИ, 1963. – 316 с.

26. Григорьев В.М. Литье по выжигаемым моделям: учебное пособие / В.М. Григорьев – Хабаровск: ХГТУ, 2002. – 46 с.

27. Озеров В.А. Литье по моделям из пенополистирола / В.А. Озеров, В.С. Шуляк, Г.А. Плотников. – М.: Машиностроение, 1970. – 182 с.

28. А.с. 718215 СССР, МПК В22С9/00. Способ изготовления замороженных форм / В.М. Грузман, В.Я. Иконников, В.В. Хлынов, Ю.И.

Василевский, А.А. Люханов (СССР). – № 2665610; заявл. 21.09.1978; опубл. 29.02.1980. – Бюл. № 17.

29. Лунев А.А. Формовочные материалы для литья в замороженные формы. Формовочные материалы при литье по выплавляемым моделям / А.А. Лунев– М.: Московский дом научно-технической пропаганды им. Ф.Э. Дзержинского, 1960. – С. 91-95.

30. Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям / С.И. Репях – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006. – 1056 с.

31. А.с. 80033 СССР, МПК В22D 15/00, В22D 27/04. Форма для отливки прокатных валков / М.М. Добровольский, А.С. Филипов (СССР) № 370932, заявл. 16.09.1947, опубл. 01.01.1949.

32. А.с. 1328056 СССР, МКИ В 22 С 1/00. Добавка для жидкостекольных смесей / Р.В. Порхунув, Л.П. Мирсанова, Ю.Д. Кузьмин, Г.Д. Конюх (СССР) № 3844723/22-02; заявл. 07.12.84; опубл. 07.08.1987. Бюл. № 29.

33. Евстигнеев А.И. Специальные технологии литейного производства. Ч.2: учебное пособие. / [А.И. Евстигнеев, Е.А. Чернышов, В.В. Петров и др.]. / Под общ. ред. А.И. Евстигнеева и Е.А. Чернышова. – М.: Машиностроение. – 2012. – 436с.

34. Йосида Киеси. Исследование способа изготовления литейных форм замораживанием / Киеси Йосида, Харуки Хино // Кинзоку. – Япония. – 1980 г. – № 4. – С. 42–46.

35. Берг П.П. Курс формовочных материалов / П.П. Берг. – Л., М., Свердловд.: ОНТИ НКТП, 1993. –382 с.

36. Гаврилин В.И. Литьё по ледяным моделям / В.И. Гаврилин // Литейное производство. – 1994. – №9. – С. 14–15

37. Салина М.В. Использование криотехнологии в литейном производстве. Литьё по ледяным моделям / М.В. Салина // Учёные записки. – 2011. – III-1(7). – С. 86–90

38. Глебов С.М. Разработка способа изготовления керамических форм и стержней замораживанием для литья ответственных деталей центробежных насосов. автореф. дис. на получения наук. степени канд. техн. наук : спец. – 05.16.04 – литейное производство / Глебов С.М. – Москва, 2009. – 68 с.
39. А. с. Способ производства отливок/ Бондаревский В.С. № 59298, 1941г.
- 40 A. Pojak. Frozen moulds: new generation of foundry moulding sands//The British Foundryman.– 1982.– V. 75.– P. 23.
41. Kijosh K., Hareikj H., Masatake T. Characterica of Frozen Mold// Kinzoku.–1980.–№4.
42. Патент Японии № 56-154248, МКИ 1322С 9/02. Способ изготовления замороженных форм.
43. Патент Японии № 56-154249, МКИ 1322С 9/02, 27/04. Способ изготовления замороженных форм.
44. Грузман В.М. Прочность и теплофизические свойства замороженных песков / В.М. Грузман, Г.Г. Копытов //Литейное производство. – 1975. – № 7. – С. 25-27.
45. Грузман В.М. Исследование температурных полей замороженных форм /В.М.Грузман, В.Я.Иконников, Е.Я.Синицин //Литейное производство. –1975. – №5. – С. 21-22.
46. Грузман В.М. Ударное взаимодействие жидкой стали с поверхностью замороженной формы / В.М.Грузман, Ю.П.Васин, Ю.И. Василевский //Литейное производство. – 1977. – № 8. – С. 24-26.
47. Грузман В.М.Исследование нагрева замороженных форм /В.М.Грузман, В.Я. Иконников // Литейное производство. – 1977. – № 12. – С. 16-18.
48. Грузман В.М. Литье в замороженные формы / В.М. Грузман //Литейное производство. – 1982. – № 10. – С. 15-17.
49. Грузман В.М. Влияние охлаждения на свойства замороженных форм и структуру стальных отливок / В.М.Грузман, Ю.И.Василевский, А.И. Килеева //Литейное производство. – 1974. – № 8. – С. 34-36.

50. Шинский О.И. Низкотемпературные литейные формы: Монография / [О.И. Шинский, Т.В.Лысенко, И.В. Прокоповичи др.]. – Одесса: Фенікс, 2017. – 248 с.
51. Бречко А.А. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами / Бречко А.А., Великанов Г.Ф. – Л.: Машиностроение, 1982. — 216 с.
52. Степанов Ю.А. Формовочные материалы / Ю.А. Степанов, В.И. Семенов. – М.: Машиностроение, 1969. – 157 с.
53. Белай Г.Е. Организация металлургического эксперимента: учеб. пособие. / Г.Е. Белай, В.В. Дембовский., О.В. Соценко // Изд. 2-е, доп. – СПб.: СЗТУ, 2010. – 225 с.
54. Грачёв Ю.П. Математические методы планирования эксперимента. / Ю.П. Грачёв, Ю.М. Плаксин – М.: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.
55. Кривошеев А.Е. Основы научных исследований в литейном производстве. / А.Е. Кривошеев, Г.Е. Белай, О.В. Соценко – Киев-Донецк: Высшая школа, 1979. – 168 с.
56. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных: Пер. с англ. / Д.К. Монтгомери – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.
57. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. / Н. Джонсон, Ф. Лион. Пер. с англ. под ред. Э. К. Лецкого – М.: Мир, 1980. – 610 с.
58. Репях С.И. О типичных ошибках при обработке экспериментальных данных (памятка для начинающих исследователей). / С.И. Репях, О.В. Соценко, А.А. Жегур // Литьё Украины. – 2011. – №11. – С. 18 – 30.
59. Новиков И.И. Металловедение, термообработка и рентгенография. Учебник / И.И. Новиков, Г.Б. Строганов, А.И. Новиков.— М.: МИСИС, 1994. — 480 с.
60. Лунев А.А. Формовочные материалы для литья в замороженные формы. Формовочные материалы при литье по выплавляемым моделям /

Лунев А.А. – М.: Московский дом научно-технической пропаганды им. Ф.Э. Дзержинского, 1960. – С. 91-95.

61. Илларионов И.Е. Формовочные материалы и смеси: Монография / И.Е. Илларионов, Ю.П. Васин. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992. – Ч. 1. – 223 с.

62. Грузмаан В.М. Замороженные формы / В.М. Грузмаан, П. Елинек, В. Беднарова.– Нижний Тагил: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ НТИ, 2004. – 194 с.

63. Минова Сусуму. Исследование влажности в замороженной форме / Минова Сусуму, Ота Хидеаки, Ниномия Мицуо // Imono J.Jap. Foundrymen's Soc. – 1980. – № 9. – С. 530–535.

64. Аксенов П.Н. Технология литейного производства / П.Н. Аксенов. – М.: Машгиз, 1957. – 664 с.

65. Рыжиков А.А. Теоретические основы литейного производства / А.А. Рыжиков. – М.: Машгиз, 1961. – 447 с.

66. Ливарні властивості металів і сплавів для прецизійного лиття: підручник для вищих навчальних закладів: 2-е вид., доп. та доопр. / В.О. Богуслаєв, С.І. Реп'ях, В.Г. Могилатенко та ін. // Під ред. С.І. Реп'яха і В.Г. Могилатенка. – Запоріжжя: АТ "МОТОР СІЧ". – 2016. – 474 с.

67. Чуркин Б.С. Теория литейных процессов: учебник. / Б.С. Чуркин - Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2006. – 453 с.

68. Дубицкий Г.М. Литниковые системы / Г.М. Дубицкий. – Свердловск: Машгиз, 1962. – 256 с.

69. Бочвар А.А. Металловедение / А.А. Бочвар. – М.: Металургиздат 1956.–495с.

70. Бочвар А.А. Исследование механизма и кинетики кристаллизации сплавов эвтектического типа / А.А. Бочвар. – М.– Л.: ОНТИ 1935.– 81с.

71. Бунин К.П. Основы металлографии чугуна / К.П. Бунин, Я.Н. Малиночка, Ю.Н. Таран. – М.: Металлургия 1969. – 415с.

72. Бунин К.П. Строение чугуна / К.П Бунин, Ю.Н. Таран. – М.: Металлургия 1972. – 160с.
73. Строганов Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. – М.: Металлургия 1977. – 272с.
74. Таран Ю.Н. Структура эвтектических сплавов / Ю.Н. Таран, В.И. Мазур. – М.: Металлургия 1978. – 312с.
75. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. – М.: Металлургия 1981. – 416с.
76. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо. – М.: Металлургия 1979. – 640с.
- 77.ГОСТ 1583-93 Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия.
78. Ватишка А. Теоретические основы литейной технологии / А. Ватишка, Й. Брадик, И. Мацашек, С. Словак. – К.: Вища шк., 1981. – 320 с.
79. Рыжиков А.А. Теоретические основы литейного производства / А.А. Рыжиков. – М.: Машгиз, 1961. – 448 с.
80. Зюзько И.В. Технологические свойства стержневых смесей на основе органических связующих типа 4ГУ / И.В. Зюзько. // Омский научный вестник. – 2009. – № 1(77). – С. 18–20.
81. Голотенков О.Н. Формовочные материалы / О.Н. Голотенков. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2004. – 164 с.
82. Электронный ресурс. Режим доступа: Формула карбоната алюминия. <http://ru.solverbook.com/spravochnik/formuly-po-ximii/formula-karbonata-alyuminiya/>.
83. Тарасевич Н.И. Моделирование процессов теплопередачи в замороженных формах / [Н.И.Тарасевич, И.В. Корниец, О.И. Шинский и др.] // Процессы литья. – 2000. – № 2. – С. 61–64.

84. Денисюк Т.Д. Электроразрядное разрушение литейных форм и стержней в различных разрядных средах / Т.Д. Денисюк, А.Р. Ризун. // Электронная обработка материалов. – 2005. – №6. – С. 83–85.

85. Пономаренко О.И. Влияние жидких отвердителей с разными добавками на свойства жидкостекольных смесей./ О.И. Пономаренко, Н.С. Евтушенко, Т.В. Берлизова // Литейное производство. – 2011. – №4 – С. 21 – 24.

86. Илларионов И.Е. Жидкостекольные смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом / И.Е. Илларионов, Н.В. Петрова // Тр. Нижегородск. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. – 2011. – №2. – С. 208–213.

87. Лисенко Т.В. Теоретичні основи формування виливків. Навчальний посібник / [Т.В.Лисенко,О.І. Пономаренко, В.П. Доценко та ін.]. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – 191 с.

88. Болдин А.Н. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справ. / [А.Н. Болдин, Н.И. Давыдов, С.С. Жуковский и др.]. – М.: Машиностроение, 2006. – 507 с.

89. Илларионов И.Е. Формовочные материалы и смеси / И.Е. Илларионов, Ю.П. Васин. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992. – 223 с.

90. Золоторевский В.С. Структура и прочность литых алюминиевых сплавов / В.С. Золоторевский – М.: Metallurgy, 1981. – 192 с.

91. Дорошенко С.П. Формовочные материалы и смеси / [С.П. Дорошенко, В.П. Авдокушин, К.А. Русин и др.]. – К.: Выща шк.; Прага: СНТЛ, 1990. – 415 с.

92. Баландин Г.Ф. Формирование кристаллического строения отливок. Кристаллизация в литейной форме / Г.Ф. Баландин - 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1973. — 288 с.

93. Кукуй Д.М. Теория и технология литейного производства. Формовочные материалы и смеси: уч. пособ. / Д.М. Кукуй, Н.В. Андрианов. – Минск: БНТУ, 2005. – 390 с.

94. Туманский А.А. Формовочные пески / А.А. Туманский. – М.: Машгиз, 1956. – 236 с.

95. Чуркин Б.С. Технология литейного производства / [Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман, С.Г. Майзель и др.]. – Екатеринбург: УГППУ, 2000. – 662 с.

96. Шинский О.И. Низкотемпературный холодильный комплекс для замораживания литейных форм и стержней / [О.И. Шинский, Т.В. Лысенко, В.В. Ясюков и др.] // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 7. – С. 21-25.

97. Жуковский С.С. Формовочные материалы и технология литейной формы. справ. / [С.С. Жуковский, Г.А. Анисович, Н.И. Давыдов и др.]. – М.: Машиностроение, 1993. – 432 с.

98. Орлов Н.Д. Краткий курс литейного производства / Н.Д. Орлов. – М.: Машиностроение, 1964. – 220 с.

99. 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. – С. 33–35.

100. Дмитриевич А.М. Книга молодого литейщика / А.М. Дмитриевич. – Минск: Беларусь, 1976. – 224 с.

101. Ясюков В.В. Композиционные вставки прессформ литья под давлением / В.В. Ясюков, Л.И. Солоненко, О.В. Цыбенко // *Металл и литье Украины*. – 2015. – №9. – С. 26–29.

102. 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.

103. Tatyana Lysenko. Quality management of castings of pipeline armature / [Tatyana Lysenko, Lyubov Bovnegra, Vladimir Tonkonogyi and etc.] // 8<sup>th</sup> International Conference “Economics and Management based on New Technologies” – EMoNT-2018. – Vrnjacka Banja, Serbia. – 2018. – P. 274-281.

104. Крымов В.Г. Ручное изготовление литейных стержней / В.Г. Крымов, Ю.Е. Фишкин. – М.: Высш. шк., 1983. – 200 с.



105. Кузелев М.Я. Справочник рабочего-литейщика / М.Я. Кузелев, А.А. Скворцов, Н.Н. Смеляков. – М.: Машгиз, 1961. – 584 с.
106. Липницкий А.М. Справочник рабочего-литейщика / А.М. Липницкий, И.В. Морозов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 344 с.
107. Лысенко Т.В. Низкотемпературный холодильный комплекс для замораживания литейных форм и стержней / [Т.В. Лысенко, О.И. Шинский, Л.И. Солоненко и др.]. // XII Международная научно-практическая конференция «Литье-2016», V Международная научно-практическая конференция «Металлургия-2016». – Запорожье. – 2016. – С. 144–146.
108. Лысенко Т.В. Анализ и синтез физико-химического воздействия на эксплуатационную надежность отливок / [Т.В. Лысенко, В.В. Ясюков, Л.И. Солоненкои др.] // Метал и литье Украины.– 2016. № 8-10. – С. 17-21.
109. 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.
110. Ясюков В.В. Кинетика затвердевания сплава при большой интенсивности теплообмена низкотемпературных форм / В.В. Ясюков, Т.В. Лысенко, Л.И. Солоненко // Металл и литье Украины. – 2018. – № 1-2. – С. 34-39.
111. 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.
112. 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.

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

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

# ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Монографія:*

1. Шинский О.И. Низкотемпературные литейные формы: монография / [О.И. Шинский, Т.В. Лысенко, И.В. Прокопович и др.]. – 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 and etc.] // 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 и др.] // 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 и др.] // Металл и литье Украины. – 2016. № 8-10. – С. 17-21.

7. Ясюков В.В. Кинетика затвердевания сплава при большой интенсивности теплообмена 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, LyubovBovnegra, Lyudmila Solonenko and etc.] // 7<sup>th</sup> 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, LyubovBovnegra, Vladimir Tonkonogyi and etc.] // 8<sup>th</sup> 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 и др.] // 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 и др.] // 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. Доценкота ін.]. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – 191 с.

## ДОДАТОК Б

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор ДП «ІЦЛПТ»

 Крейпер О.А.

20 грудня 2017 р.



### А К Т



Ми, що підписалися нижче, від ДП «Інженерний центр литва під тиском» («ІЦЛПТ») провідний технолог Конюхова Жанна Олександрівна, головний конструктор Куперман Олександр Яковлевич і від Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології та управління ливарними процесами Лисенко Т.В. та інженер Солоненко Л.І. склали цей акт в тому, що в 2017 році в ливарному цеху «ІЦЛПТ» були проведені випробування технології виготовлення вилизків «Кришка» зі сплаву АК5М2 в низькотемпературні форми (НТФ) з ливниковою системою, виготовленою за рекомендаціями Л.І. Солоненко.

До складу суміші для НТФ входили (за масою): кварцовий пісок Вільногірського родовища  $1K_3O_3016$  (90%), глина бентонітова С2Т<sub>2</sub> Дашуковського родовища (5%) та вода водопровідна (5%). Для формування використовували суміш після добової витримки з моменту закінчення її приготування. Виготовлення вилизків проводили в два етапи – в зимовий (35 вилизків) та літний (35 вилизків) періоди з температурою повітря в ливарному цеху, відповідно, +10...+12 та +25...+34 °С. Початкова температура НТФ складала  $-20 \pm 1$  °С, тривалість витримки форм на повітрі до заливки не перевищувала 3...5 хв.

Встановлено, що всі виливки, отримані відповідно до розробленої технології виготовлення НТФ та конструкції ливникової системи, мають гладку поверхню і характеризуються відсутністю ужимин, гарячих тріщин, раковин, засмічень, пригару і видимої неозброєним оком хвилястості поверхні. При цьому, використання НТФ на 60...75 % покращило геометрію і розмірну точність вилизків «Кришка» у порівнянні з аналогічними виливками, що виготовляють в піщано-глинистих формах за технологією ливарного цеху підприємства.

Всі виготовлені виливки-представники пройшли всі види контролю якості, передбачені технологічним процесом ливарного цеху, визнані придатними і передані в механічний цех для подальшої механічної обробки.

Від ДП «ІЦЛПТ»:

Конюхова Ж.О.

Куперман О.Я.

Від ОНПУ:


Лисенко Т.В.

Солоненко Л.І.

ДОДАТОК В  
ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС



УКРАЇНА

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
Ministry of Education and Science of Ukraine

**ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
ODESSA NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY

пр. Шевченка, 1, м. Одеса-44, 65044 Україна  
тел.: +38 048 7223474, факс: +38 0482 344273

Shevchenko av., 1, Odessa-44, 65044 Ukraine  
phone: +38 048 7223474, fax: +38 0482 344273

E-mail: opu@opu.ua <http://www.opu.ua>, Код ЄДРПОУ 02071045

*02.02.2018 № 253/05-06*  
На № \_\_\_\_\_

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
аспіранта Солоненко Л.І. на тему: «Теоретичні та технологічні основи  
виготовлення виливків з алюмінієвих сплавів в екологічно безпечні  
низькотемпературні кварцові форми» у навчальний процес кафедри  
технології та управління ливарними процесами

Наукові результати та технічні рішення, що отримані Солоненко Людмилою Ігорівною у рамках дисертаційної роботи на тему: «Теоретичні та технологічні основи виготовлення виливків з алюмінієвих сплавів в екологічно безпечні низькотемпературні кварцові форми», впроваджені у навчальний процес на кафедрі технології та управління ливарними процесами при викладанні дисциплін «Теоретичні основи ливарного виробництва», «Моделювання та оптимізація технологічних систем», «САПР ливарних технологій», а також у курсовому і дипломному проектуванні.

Проректор з науково-педагогічної  
та виховної роботи Одеського  
національного політехнічного  
університету, д.т.н., проф.

