

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії чорних металів і ливарного виробництва

Пояснювальна записка
до випускної атестаційної роботи магістра

зі спеціальності 136 – Металургія
ОП «Ливарне виробництво чорних та кольорових металів і сплавів»

на тему:

**Розробка та удосконалення технології лиття сталевих
виливків за газифікованими моделями**

Виконав: студент групи ЛВ-24-1м
Керівник випускної роботи
Нормоконтролер
Завідувач кафедри

Халімонов Д.Ю
Саїтгареев Л.Н.
Саїтгареев Л.Н.
Савельєв С.Г.

Кривий Ріг
2025 р.

**ВІДОМОСТІ ОБСЯГУ МАТЕРІАЛІВ
КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ**

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кіл.	Примітка
				<u>Документація</u>		
A4		1	КНУ.РМ.136.25.500с-15 ПЗ	Пояснювальна записка		
				<u>Графічні матеріали</u>		
A4		2	КНУ.РМ.136.25.500с-15 ПР	Презентація		
A4		3				
A4		4				
A4		5				

					КНУ.РМ.136.25.500с-15 ВМ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВІДОМІСТЬ МАТЕРІАЛІВ		
Розроб.		Халімонов Д.Ю					
Перевір.		Саїтгареев Л.Н.					
Н. Контр.		Саїтгареев Л.Н.					
Затверд.		Савельєв С.Г.			ЛВ-24-1М		
					Лім.	Арк.	Акрушіє
						2	1

РЕФЕРАТ

Магістерська робота присвячена розробці та удосконаленню технології лиття сталевих виливків за газифікованими моделями (ЛГМ), що зумовлено потребою підвищення точності, ефективності та економічності сучасного ливарного виробництва.

Метою магістерської роботи є розробка та наукове обґрунтування раціональних технологічних рішень для отримання високоточних сталевих виливків методом ЛГМ з використанням комбінованих модельних матеріалів та оптимізованих режимів лиття.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі основні завдання: аналіз сучасного стану проблеми за даними науково-технічної літератури; обґрунтування складу модельного матеріалу з використанням ливарного та будівельного пінополістиролу; розробка складу антипригарного покриття; експериментальне дослідження впливу товщини покриття на шорсткість поверхні та величину пригарту; дослідження властивостей формувальних пісків; оптимізація конструкції опоки та режимів вакуумування.

У роботі застосовано комплекс сучасних методів дослідження: фізико-механічні випробування, вимірювання газопроникності, пористості та шорсткості поверхні, металографічний аналіз, методи математичного планування експерименту та статистичної обробки результатів, а також комп'ютерне моделювання процесів заповнення та затвердіння виливків.

Практичне значення роботи полягає у впровадженні рекомендацій щодо застосування дешевших модельних матеріалів, оптимізованих режимів заливки та вакуумування, що забезпечує зниження собівартості продукції, зменшення рівня браку та підвищення технологічного виходу придатних виливків.

Структура магістерської роботи включає: вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи становить ____ сторінок основного тексту. У роботі наведено 32 рисунки та 18 таблиць.

Ключові слова: ЛИТТЯ ЗА ГАЗИФІКОВАНИМИ МОДЕЛЯМИ, СТАЛЕВІ ВИЛИВКИ, ПІНОПОЛІСТИРОЛЬНІ МОДЕЛІ, АНТИПРИГАРНЕ ПОКРИТТЯ, ФОРМУВАЛЬНІ СУМІШІ, ВАКУУМУВАННЯ ФОРМИ, ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ.

ЗМІСТ

ВСТУП	
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ В ГАЛУЗІ ЛИТТЯ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ, І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	
Висновки до розділ	
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	
2.1.Характеристика вихідних матеріалів і методи підготовки зразків	
2.2.Методи проведення експериментів	
2.3. Планування експерименту та його аналіз	
Висновки до розділ	
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ ОТРИМАННЯ ЯКІСНОГО ЛИТВА	
3.1.Дослідження макроструктури та властивостей полістиролу	
3.2.Визначення оптимального складу протипригарної фарби	
3.3.Оптимізація конструкції модельно-опічного оснащення	
3.4.Дослідження структурно-механічних властивостей пісків	
Висновки з розділу	
4.РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЛИТТЯ ВИЛИВКІВ	
4.1.Дослідження впливу технологічних параметрів заливки на властивості виливків	
4.2.Моделювання процесу заливання та затвердіння відливки	
4.3.Дослідження глибини науглецювання виливків	
Висновок до розділу	
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	
РОЗДІЛ 6 ОЦІНКА СТАНУ УМОВ ПРАЦІ І БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ПІСЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	

ВСТУП

Актуальність дослідження.

Виробництво власного високоточного лиття для будь-якої країни є завданням стратегічного значення, оскільки забезпечує економічну самостійність і визначає базу для розвитку національного машинобудування.

Останнім часом велику увагу приділяють технології отримання виливків за моделями, що газифікуються (ЛГМ), і в Україні ця технологія починає набувати поширення. Сфера застосування ЛГМ може охопити майже все традиційне піщане формування, особливо це актуально в одиничному і дрібносерійному виробництві.

Однак, незважаючи на перспективність способу ЛГМ, досі перевагу віддають піщано-глинистому формуванню (ПГФ) і холоднотвердим сумішам (ХТЗ), оскільки лиття за моделями, які газифікуються, пов'язане з низкою проблем, зокрема, дорожнеча матеріалу моделі (ливарного полістиролу), науглецювання поверхні відливка та ін. Вирішення цих і пов'язаних з ними інших проблем і визначає актуальність теми цієї магістерської роботи.

Об'єкт дослідження: технологія виготовлення виливків методом ЛГМ з використанням різних модельних матеріалів.

Предмет дослідження: властивості модельного матеріалу, їхній вплив на технологічні параметри процесу ЛГМ.

Цілі дослідження: розробити технологію виготовлення високоточних виливків методом ЛГМ з використанням нових модельних матеріалів.

Завдання дослідження:

- ✓ обґрунтувати і визначити склад матеріалу моделі на основі ливарного і будівельного пінополістиролів;
- ✓ визначити склад протипригарної фарби для нового модельного складу при ЛГМ;
- ✓ дослідити вплив складу моделі на якість одержуваного виливка (величину пригару, шорсткість, величину науглецювання виливка, кількість ливарних дефектів тощо);
- ✓ дослідити властивості вогнетривких наповнювальних пісків;
- ✓ розробити конструкцію вакуумованої опоки д;
- ✓ змодельювати процес затвердіння виливки, отриманої при використанні нового модельного складу;

Практична значимість:

- ✓ Рекомендовано комплексний склад матеріалу моделі з використанням будівельного полістиролу, що забезпечує зниження собівартості процесу лиття за рахунок застосування відходів дешевшого будівельного пінополістиролу.
- ✓ Запропоновано технологічні режими виготовлення виливків ЛГМ з використанням нових модельних складів.
- ✓ Реконмендовано нову конструкцію опоки, що дає змогу скоротити величину браку під час заливання ливарної форми .

- ✓ Розроблено склад протипригарної фарби для нового модельного складу.

Наукова цінність роботи:

- ✓ визначено залежність впливу розміру гранул пінополістиролу на швидкість вигорання;
- ✓ виведено рівняння: залежності шорсткості поверхні виливки від вмісту будівельного пінополістиролу та товщини антипригарного покриття;
- ✓ визначено залежність газопроникності моделі, шорсткості та величини пригару виливка від товщини шару протипригарної фарби на моделі;
- ✓ визначено вплив складу моделі на шорсткість, величину пригару виливки та глибину шару науглецювання.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, ____ розділів, списку використаних джерел зі ____ найменувань, викладена на ____ сторінках, містить ____ рисунків та ____ таблиці.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ В ГАЛУЗІ ЛИТТЯ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ, І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Сучасний стан питання в галузі технологічних режимів під час ЛГМ

Розвиток і впровадження у виробничий цикл машинобудування лиття за моделями, що газифікуються зумовлене високими техніко-економічними показниками (зниження трудовитрат, у %, на зачищення виливків до 30-50, на формування до 25-30, на виготовлення стрижнів до 25-100, а також до 15-20 збільшується точність виливків, на 10-15 знижується маса, на 25-30 зменшуються капітальні витрати) [1].

На думку американських фахівців, ЛГМ є одним із перспективних сучасних способів лиття, що задовольняють потреби великосерійного виробництва у виливках високої точності. Виробництво виробів таким способом передбачає розкладання пінополістирольної моделі потоками рідкого металу у формі з утворенням підвищеного об'єму токсичних газів і парової суміші: ізопентан, бензол, толуол, етилбензол, стирол, а також H_2 , N_2 , CO (чадний газ), CH_4 (метан), C_2H_4 (етилен).

Інтенсивність протікання реакцій розкладання вуглеводнів на дзеркалі металу і у формі та кількість кінцевих продуктів, що реагують з металом, дуже високі внаслідок безперервної їх генерації під час розкладання моделі в процесі заповнення форми. Таким чином, високий економічний ефект ЛГМ перебивається необхідністю в дорогому обладнанні для уловлювання, конденсації та нейтралізації продуктів розкладання пінополістирольної моделі.

Дійсно, лиття за моделями, що газифікуються, належить до маловідходного виробництва. Формований пісок ретельно просівається, подається елеваторами в охолоджувач, після чого повертається на формування. При цьому видаляються шкідливі гази і пил. Протипригарні покриття на водних сполучних практично не забруднюють пісок і легко відокремлюються під час просіювання і в системі охолодження. Один-два рази на рік пісок очищають методом терморегенерації. Для видалення пилу на виробництвах використовують аспіраційні установки і циклони з високим ступенем очищення. Багаторазове використання піску дає змогу домогтися мінімальних втрат - всього 0,5-1% (пил кварцового піску, залишки фарби).

Сучасний стан особливостей виробництва виливків литтям за моделями, що газифікуються, розглядається в багатьох роботах.

Так, у статті [2] представлено основні чинники, що найбільшою мірою впливають на якість і точність виливки, яку виготовляють методом лиття за моделями, що газифікуються. Зазначено основні вимоги, що висуваються до матеріалів для виготовлення газифікованих моделей. Показано особливості застосування ливарного сополімеру японської фірми JSP Corporation марок Clearor CL500A і Clearor CL600A, а також ливарного спінуваного

полістиролу Styrochem (Канада).

В роботі [3] проведено дослідження охолодження рідкого металу в процесі заповнення форми на основі аналізу розв'язання рівняння теплопровідності при термодеструкції матеріалу моделі. Показано, що інтенсивність охолодження підвищується при збільшенні швидкості заливки і зниженні величини розрідження в опоці. Запропоновано рівняння для розрахунку температури поверхні металу, що враховує енергію термодеструкції матеріалу моделі, швидкість заливання, початкову температуру металу, розрідження в опоці, площу поперечного перерізу виливка під час лиття.

На основі аналізу потоків продуктів термодеструкції пінополістиролу (ППС) проведено дослідження заповнення форми металом [4]. Розроблено математичну модель процесу, засновану на витісненні газоподібних продуктів термодеструкції ППС із зони газифікації моделі надлишковим тиском у газовому проміжку між ППС і рідким металом. Виконано порівняння результатів розрахунків з наявними експериментальними даними щодо залежності тиску в газовому проміжку від часу і вимірами тривалості часу заливки реальних виливків. Зазначено задовільну схожість розрахункових залежностей і показників із дослідними. Запропоновано формулу для розрахунку тиску в зоні термодеструкції, яка визначає стійкість форми та умови отримання придатних виливків, а також метод розрахунку часу заповнення форми

На основі математичної моделі кінетики заповнення форми під час лиття за моделями, що газифікуються, проведено дослідження процесу виникнення низькочастотних пульсацій рідкого металу у формі. Показано [5], що заповнення форми відбувається з деяким запізненням, внаслідок якого утворюється газовий проміжок між матеріалом моделі, що газифікується, та рідким металом, який отримує механічний імпульс, що спричиняє коливання його рівня в стояку та тиску в газовому проміжку. Показано, що власна частота коливань у газовому проміжку спочатку різко, а потім повільно зменшується під час заповнення форми металом. При цьому вона слабо залежить від газопроникності форми, трохи зростаючи, а потім стабілізуючись у разі збільшення швидкості подачі рідкого металу у форму, і знижується у разі збільшення розрідження в опоці.

Авторами [6] розроблено математичну модель взаємодії рідкого металу з впровадженими в пінополістирол ливарної моделі металевими включеннями, що враховує кінетику заповнення форми, вплив термодеструкції пінополістиролу і теплообмін основного сплаву і матеріалу наповнювача. Наведено результати експерименту з отримання дослідних зразків литтям за газифікованими моделями, що підтверджують прогнози математичного моделювання.

Розроблено математичну модель для розрахунку температурного поля, що встановилося після завершення заливки рідкого сплаву за умови додаткового розміщення в моделі з пінополістиролу металевих частинок

наповнювача [7]. Виявлено ефект ступінчастого падіння температури сплаву, що заливається, який зумовлений термодеструкцією пінополістиролу і теплообміном із частинками наповнювача. Встановлено залежності цього температурного ефекту від об'ємної частки наповнювача в ділянці його розміщення і співвідношення теплофізичних властивостей основного сплаву і матеріалу наповнювача.

Природу поверхні розділу "рідкий метал-модель" під час заповнення форми при литті алюмінієвих сплавів зі спіненого пінопласту досліджували з використанням рентгенографії в реальному часі як для нормального спіненого полістиролу, так і для бромованого пінополістиролу. Заповнення форми під дією сили тяжіння зверху або знизу мало впливало на властивості, в обох випадках призводячи до великого розкиду значень міцності на розрив (кількісно визначається їх модулем Вейбулла). Заповнення контргравітацією за різних швидкостей продемонструвало, що найменший розкид значень міцності на розрив (найвищий модуль Вейбулла) був пов'язаний із самим повільним заповненням, коли мала місце плоска поверхня розділу рідкий метал-модель. Рентгенографія в реальному часі показала, що фронт рідкого металу, який просувається, ставав нестабільним вище за певну критичну швидкість, що призводило до винесення руйнівного матеріалу зразка і пов'язаних із ним дефектів. Було висловлено припущення про те, що перехід рухомого кордону між рідким металом і моделлю є нестабільним.

Роботу [8] присвячено литтю переважно у вакуумованих піщаних формах середніх і великих виливків. Для стабільного спалювання газів за різних ливникових систем у вакуумованих формах методом виведення з рухомого зазору між рідким металом і матеріалом моделі продуктів газифікації на верхню поверхню форми та спалювання цих продуктів застосовували подачу в цей зазор потоку повітря через трубку і канал у моделі. Кисень повітря, що подається, частково окислював парогазову фазу вуглеводнів моделі, а азот повітря витісняє газ до виходу з форми для спалювання на її поверхні, де газ горить факелом без запаху з повним знешкодженням. Згоряння газів за межами форми значно знижує потужності та енерговитрати витяжної вентиляції, покращує умови праці в ливарному цеху та має екологічний ефект зниження забруднення навколишнього середовища.

В роботі [9] наведено огляд способів лиття за моделями, що газифікуються, де розглянуті варіанти усунення викидів продуктів від газифікації моделі в повітря цеху та мінімізація забруднення ними піску форми. При переході від лиття 3D-друкованими полімерними моделями, які випалюють у печах з оболонкових форм, на ЛГМ з такими самими моделями у вакуумованих формах із сипкого піску під час окиснення продуктів газифікації зменшується тривалість і спрощується виготовлення піщаної форми. Застосування адитивно виготовлених моделей слугує одним із прикладів цифро-фізичного перетворення в металообробній галузі, несе перевагу "конструкційної свободи", особливо під час виготовлення біонічних

конструкцій легковагових виливків.

В огляді [10] описано способи з використанням регульованого тиску на метал або поверхню виливки в ливарній формі. Застосування ізостатичного тиску (всебічної дії) на виливок у період затвердіння металу дає змогу отримувати високоякісні виливки з алюмінієвих сплавів для транспортних засобів.

Однією з основних проблем під час лиття за моделями, що газифікуються, які стримують розвиток цього способу лиття, є відсутність коректного теоретичного опису процесів віброущільнення, які відбуваються під час виготовлення форм із сухого формувального піску [11]. Внаслідок особливостей поведінки піску як сипучого матеріалу під впливом вібрації, традиційні методи, засновані на механіці суцільних середовищ, мають обмежену застосовність. Один із можливих теоретичних підходів - механіка зернистих середовищ, розроблена І.І. Кандауровим. Однак ця модель сама по собі побудована на припущеннях, використання яких неприйнятне при моделюванні віброущільнення. У роботі запропоновано деякі шляхи "подолання" цих припущень, за реалізації яких можлива побудова розширеної механіки зернистих середовищ, придатної для опису процесів віброущільнення.

Досліджено [12] різні формувальні піски для технології лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ). Показано вплив властивостей пісків на якість одержуваної виливки. Зроблено висновки, що формувальний матеріал може відігравати вирішальну роль в одержанні якісного відливка, і під час вибору піску необхідно дотримуватися всіх характеристик піску: форми та розміру зерна (фракції), масової частки глинистої складової та вологості, нехтування навіть однією з яких може призвести до небажаних результатів.

У статті [13] наведені результати дослідження температурних режимів плавки і заливки Al-сплавів. У розглянутих виробничих умовах найефективнішими режимами, що забезпечують найкращі якісні показники герметичних виливків за розмірною точністю і чистотою поверхні, виявилися: температура - перегріву розплаву - 880-890°C, заливки у форму - 820-830°C.

Нині лиття за моделями, що газифікуються, є сучасною, технологією в ливарній промисловості. Незважаючи на те, що техніка лиття відносно проста, до матеріалів моделі висуваються високі вимоги.

Також поряд із закономірностями формоутворення велике значення мають і процеси формування самої виливки. Особливо важливими є процеси об'ємної усадки виливка під час кристалізації залитого у форму металу, що багато в чому визначає якість литих заготовок, витрату металу на надливи та ливникові системи, тобто технологічний вихід придатного і собівартість виливків. Тому екзотермічний розігрів металу надливів виливків, що дає змогу скоротити витрату металу на надливи, і, тим самим, збільшити технологічний вихід придатного є актуальним завданням ливарного виробництва. Під час ЛГМ виникають особливі умови: вакуумування форм під час заливання металу і його кристалізації, формування в них відновлювальної атмосфери з

вуглеводнів - продуктів термодеструкції пінополістирольної моделі, ендотермічний ефект від газифікації моделі та подальшого піролізу її продуктів.

В роботі [14] досліджено процес заливки металу під час лиття за моделями, що газифікуються, і розроблено методи розрахунку температурного поля у виливку після завершення заповнення форми.

Розроблено систему створення розрідження в опоках під час ЛГМ [15]. Параметри системи розраховані на підставі аналізу закономірностей і даних експериментів процесу термодеструкції пінополістиролу. Розроблено емпіричні рівняння для розрахунку об'ємів газоподібних продуктів у розрахунку на одиницю маси ППС і придатного для різних сплавів. Максимальне виділення газів відбувається при литті сталей, а мінімальне - при литті Cu-сплавів. На основі розрахунків створено систему розрідження в опоці та видалення газів під час лиття. Система підтримує в процесі заливки розрідження в опоці від -40 до -20 кПа, яке дає змогу отримувати заготовки масою до 200 кг.

В роботі [16] проведено експериментальні дослідження впливу парогазової фази, що утворюється під час ТД полістиролової моделі, на процес заповнення порожнини ливарної форми розплавом під час лиття сталевих сплавів за моделями, що газифікуються. Визначено значення коефіцієнта витрати ливникової системи при литті за моделями, що газифікуються, з нижнім підведенням розплаву.

У [17] наведено опис можливості переробки техногенних відходів полістиролу в сполучних матеріалах для ливарного виробництва. Незалежно від кількості аналізованого ацетону полістирол поглинає його у співвідношенні 1:1 з утворенням набряклого осаду. Отримані дані дослідження "полістирол-ацетон" успішно використані як базові елементи технології клітинних полістирольних моделей з імплантатами. У цьому разі основним фактором є кінетика пінополістиролу під час набрякання ацетону і склад набряклого пінополістирольного осаду.

Наявність пір у структурі полістиролу можна простежити за умовами, створеними під час заповнення прес-форми і подальшого спінювання [8]. Утворення і закриття пор, або заліковування, спостерігали з використанням високошвидкісного відеозображення через прозорий акриловий лист, вирізаний для відповідності половині форми зразка. Було показано, що два режими обробки, тобто початкова щільність внаслідок пакування гранул і швидкість пари під час її проходження між гранулами, значно впливають на здатність пор змінюватися під час пропарювання. Пропонується модель для прогнозування умов, коли пори будуть закриватися.

У ЛГМ актуальним технологічним завданням є запобігання утворенню пригару на сталевих і чавунних виливках [18]. У результаті досліджень розроблено відповідні склади протипригарних модельних фарб з використанням рециклінгу і наноструктурованих матеріалів. До їхнього складу крім "традиційних" добавок (крохмаль (згущувач), бентоніт

(стабілізатор), лігносульфонат технічний (сполучна і поверхнево-активна речовина), змочувач ОП-7) входять такі прогресивні матеріали. Для сталевих ЛГМ: водний розчин алюмоборфосфатного концентрату, периклаз порошкоподібний, наноструктурований алмазний порошок, електрокорунд білий. Для чавунного ЛГМ: зазначені вище матеріали, але замість дорогого електрокорунду - поворотна шихта електродного виробництва. Основні технологічні характеристики розроблених складів протипригарних модельних фарб: умовна в'язкість за ВЗ-6: 18...25 с; залишкова вологість 1...1,5%, газопроникність 40...50 од.

Розглянуто властивості ПП на водній основі та цирконового концентрату з додаванням активованої глини, завдяки чому поліпшено технологічні та протипригарні властивості покриття [19].

Підвищення якості виливків, отриманих литтям за моделями, що газифікуються, розглянуто в роботі [20]. Тут розглянуто питання гомогенності виливків, зниження кількості ливарних дефектів, підвищення геометричної розмірної точності та зниження шорсткості поверхні виливків.

У роботі [21] досліджено вплив різних температурних режимів перегріву і заливки розплаву на чистоту поверхні і розмірну точність виливків зі сплаву АК7.

У роботі [22] наведено результати досліджень з поверхневого зміцнення сталевих деталей, отриманих під час кристалізації. На поверхню моделі наноситься обмазка з поверхнево-активних речовин (ПАР). Показано механізм формування дифузійного шару в процесі кристалізації. Металографічні та дюрметричні дослідження показали перспективність використання у складі ПАР одночасно хрому, кремнію та нікелю.

Аторами [23] розглянуто проблеми попередження об'ємних усадочних дефектів у виливках. Виконано аналіз механізму та умов їх утворення. Виявлено закономірності процесу формування осьової усадочної пористості у виливках великої протяжності. Показано значення спрямованого затвердіння елементів виливки як способу запобігання утворенню цього дефекту. Запропоновано застосування внутрішніх холодильників у моделях, що газифікуються, монолітних і дискретних внутрішніх холодильників.

Спосіб підвищення абразивної зносостійкості деталей шляхом отримання методом лиття за моделями, що газифікуються, описано в [24]. Спосіб оптимізації зміцнення деталей робочого шару, що працюють в умовах високої абразивності, має такий вигляд: на полістирольну модель у ливарній формі наносять заздалегідь підготовлені м'які вогнетривкі частинки WC і TiC у співвідношенні 70/30 мас. %. Після того, як метал заливають у форму, витримують для кристалізації, а потім проводять дослідження. Вивчення макро- і мікроструктури отриманих зразків дає змогу стверджувати, що товщина і структура отриманого зміцненого шару залежить від тривалості взаємодії суміші твердіших карбідів і рідкого металу. Різний характер взаємодії різних дисперсних частинок і металу матриці спостерігався за одних і тих самих умов. Випробування на абразивну зносостійкість отриманих

матеріалів методом розрахунку залишкових мас проводилися в лабораторних умовах. Результати дослідження зносостійкості засвідчили, що спосіб отримання твердшого покриття із суміші карбіду вольфраму та карбіду титану шляхом нанесення на поверхню моделі з пінополістиролу перед формуванням дає змогу отримувати деталі з високою міцністю.

В роботі [25] наведено дані про лінійну усадку і науглецювання виливків зі сталі 30Л. Показано, що зі збільшенням щільності моделей усадка виливків підвищується. Науглецювання залежить від габаритних розмірів виливки і типу ливниково-живильної системи.

Розглянуто спосіб [26] отримання виливків із сірого чавуну (СЧ) литтям за моделями, що газифікуються (МГМ), з формуванням карбідів титану в поверхневому шарі. Показано, що карбіди титану утворюються в результаті взаємодії вуглецю розплаву з Ті-вмісними добавками, введеними в моделі з пінополістиролу. Представлено результати фазового аналізу та структури легованих шарів. Відображено вплив способів введення та характеристик Ті-вмісних добавок на структуру поверхневих шарів у виливках.

Наведено результати [27] розроблення та реалізації у виробничих умовах ресурсозберігаючої технології отримання алюмінієвих сплавів для корпусного тонкостінного лиття за моделями, що газифікуються, що включає термошвидкісну обробку розплаву. Представлена технологія сприяла підвищенню рівня механічних властивостей виливків: тимчасового опору розриву на 14-22%, відносного подовження на 32-75%.

У роботі [28] розглянуто спосіб формування поверхневого легованого шару підвищеної твердості, що містить диборид титану TiB_2 , на чавунних виливках. Показано, що TiB_2 утворюється в процесі синтезу в легованих шарах за ініціації теплотою розплаву, що заливається.

Наведено результати [27] експериментальної діагностики структури, фазового складу і властивостей поверхневого шару виливків сталі та чавуну після легування композиціями В 4С-Ті, В 4С-FeТі під час лиття за моделями, які газифікуються, та при різних способах їх введення. Встановлено, що незалежно від способу введення композиції процеси фізико-хімічної взаємодії за механізмом саморозповсюдженого високотемпературного синтезу між компонентами легуючих композицій і розплаву, що заливається, призводять до формування боридів, нітридів, карбідів і карбонітридів титану та заліза. Цим зумовлено підвищення твердості легованого шару виливків у разі.

У роботі [29] розглянуто спосіб глибинного легування необхідних ділянок заготовок. Спосіб здійснюється розміщенням (з постійним кроком) вставок у вигляді тонких металевих пластин або голок заданого складу, для збільшення експлуатаційних характеристик виливків, у модель з пінополістиролу. При заливці моделей розплавом формується легований шар заданої глибини. Досліджено вплив вуглецю в залізовуглецевих розплавах на структуру, фазовий, хімічний склад і товщину легованих хромом поверхневих шарів виливків, отриманих литтям за моделями, які газифікуються.

Проблемам науглецювання виливків і питанням його зниження

присвячені роботи [30,31]. Розглянуто можливість знеуглецювання лиття подальшою термічною обробкою за різними режимами. Показано ефективність такої термічної обробки для знеуглецювання сталей, отриманих методом ЛГМ. Встановлено, що найбільший вплив на структуру виливків має термоциклічна обробка.

У роботі [32] проведено експерименти зі зниження ліквідації вуглецю у виливках зі сталі 20ГЛ з товщиною стінки 15 мм шляхом проведення термічної обробки (нормалізації) за двома режимами, а також проведено оцінку впливу модифікатора FIL-1 на структуру виливків. Розглянуті структури до термічної обробки та після неї. встановлено, що до термообробки зразки зі сталі 20ГЛ без модифікатора мають найбільший науглецьований шар (до 2 мм), тоді як у зразках із модифікатором цей показник не перевищує 0,8 мм, встановлено оптимальний режим термообробки для модифікованих зразків (нормалізація при температурі 950°C та витримка протягом 1 год), який приводить до розподілу вуглецю з науглецьованої поверхні зразків по всьому їхньому перерізу, подрібненню структури та переходу її в рівноважний стан.

Радикальне рішення щодо усунення науглецювання - досягається використанням сополімеру (монометилметакрилату) в якості матеріалу моделей. Вартість сополімеру у п'ять разів вища за пінополістирол, проте сополімер вимагає високої культури виробництва - дуже точного дотримання температурних і часових режимів передвспінювання і виготовлення моделей, що передбачає використання для цих цілей високоякісного обладнання. З економічної точки зору використання сополімеру доцільно під час виробництва литва з високою додатковою вартістю, наприклад - блоки циліндрів, головки блоків циліндрів.

Існує низка прийомів [33], що дають змогу тією чи іншою мірою знизити ступінь науглецювання сталевих виливків, але не усунути його повною мірою: використання пінополістиролу низької густини; застосування протипригарного покриття з високою газопроникністю; вибір оптимальної швидкості підйому металу у формі; використання заливної лійки зі стояком із теплоізоляційного матеріалу; використання випорів на верхніх поверхнях виливків.

Висновки до розділу

1. Основними проблемами способу ЛГМ є:
 - ✓ науглецювання поверхневого шару сталевих виливків під час вигорання полістиролової моделі;
 - ✓ висока вартість ливарного полістиролу, що використовується як модельний матеріал. Ця обставина визначає досить високу вартість кінцевого лиття, що є стримувальним фактором поширення ЛГМ у нашій країні.
2. У світовій практиці під час виробництва моделей при ЛГМ не використовують гранули будівельного полістиролу. Проведений

інформаційний аналіз показав можливість їхнього використання як складової модельного матеріалу.

РОЗДІЛ 2.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика вихідних матеріалів і методи підготовки зразків

За результатами літературного огляду і з урахуванням марок ППС, що використовуються в даний час на ливарних підприємствах в дослідженні використовувався ливарний полістирол марок ПСВ-Л1, ПСВ-Л2. В якості добавки для комплексного складу моделі було обрано будівельний пінополістирол марок ППС-10, ППС-20, оскільки він є найпоширенішим.

З метою зниження собівартості пропонується використовувати для матеріалу моделі комбінацію будівельного (рисунок 2.1а) і ливарного полістиролу (рисунок 2.1б). Відповідно, у комбінованій моделі (рисунок 2.1в) будуть поєднання великих і дрібних зерен, що, своєю чергою, підвищить щільність, яка, як відомо, впливає на зниження науглецювання поверхневого шару відливки під час випалювання моделі.



а



б



в

а - ливарний пінополістирол (розмір зерна 0,3-0,6 мм); б - будівельний пінополістирол (3-4 мм); в - комплексний пінополістирол (1-1,5 мм).

Рисунок 2.1 - Структура пінополістиролів різних марок

Склади полістиролових моделей, що використовуються в дослідженнях, наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 -

Склад полістиролових моделей, що використовуються в експериментах

№зразка	Ливарний полістирол ПСВ-Л1, %	Будівельний полістирол ППС-20, %
1	-	100
2	100	-
3	50	50
4	60	40
5	70	30
6	80	20
7	90	10

Моделі отримували із суміші ливарного полістиролу з фракціями 0,7...1,0 мм (розмір гранул, що поставляються) і гранул будівельного пінополістиролу розміром до 3,0 мм (основні розміри гранул будівельного полістиролу) в кількості 10-50%. Полістирол, згідно з технологією, прийнятою на експериментальній виробничій дільниці, попередньо підспінювали на парі та просушували, потім задували в прес-форму, яку витримують в автоклаві

доти, доки гранули полістиролу не спечуться [33].

2.2.Методи проведення експериментів

Для досліджень зразків було використано стандартизовані методики та сучасне обладнання акредитованих лабораторій

Визначалися такі параметри як міцність на стискання, міцність на розрив, пористість, газопроникність, шорсткість, а також величина пригару і шорсткість виливки.

Дослідження мікроструктури отриманих зразків проводили на мікроскопі Tescan Vega.

Шорсткість вимірювали портативним вимірювачем шорсткості TR 100 згідно з ГОСТ 2789-73 "Шорсткість поверхні. Параметры и характеристики". Шорсткість зразків і литих заготовок визначали після їх очищення з використанням приладу для вимірювання шорсткості TR-220.

Пригар визначали так: виливки охолоджували до кімнатної температури, після чого з них вирізали зразки розміром 30×30×15 мм. З поверхні зразків видаляли легко відокремлюваний пригар піску і залишку полістиролової моделі. Для видалення пригару, що залишився, який важко відокремлюється, зразки занурювали в розплав їдкого натру при температурі 500°C і витримували в ньому протягом 4...6 годин (по досягненню постійної ваги зразка). За кількісну характеристику пригару приймали відношення ваги пригару до площі поверхні зразка (г/см²) [33].

Для визначення міцності на стискання і вигин застосовували підлогову установку для визначення механічних властивостей з використанням ДСТУ 25.506-85 "Розрахунки і випробування на міцність, методи механічних випробувань металів. визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) при статичному навантаженні" і ГОСТ 1497-84 "Металлы. Методи випробувань на розтягнення".

Визначали залежність газопроникності форми від складу моделі. Для перевірки газопроникності моделі застосовували загальновідому методику за ДСТУ 23409.6-78 "Піски формувальні, суміші формувальні та стрижневі. Метод визначення газопроникності". Випробовували зразки діаметром 50 мм, які вирізали з моделі. Також як наповнювальну суміш використовували різний фракційний склад піску трьох основних фракцій - 160 мкм, 200 мкм, 316 мкм .

Газопроникність моделей визначали за загальновідомою методикою на приладі для визначення газопроникності марки 04315M.

Визначення відкритої пористості здійснювали методом ртутної порометрії з використанням порометра 400. Цей модуль порознометра дає змогу досягати тиску до 400 МПа і дає можливість вивчати матеріали різного ступеня твердості. Висока роздільна здатність і висока швидкість аналізу є основними особливостями Pascal 440.

Повноту згоряння визначали шляхом зважування залишку на вагах після витримання полістиролових зразків за різних температур спікання в печі .

Товщину протипригарного покриття вимірювали за допомогою товщиноміра

Напруження у виливках визначали за допомогою вимірювача концентрації напружень ІКН-3М-12. Вимірювач дає змогу визначати, реєструвати й обробляти дані діагностики напружено-деформованого стану металів і сплавів за допомогою методу магнітної пам'яті металу. За принципом роботи прилад ІКН-3М-12 є спеціалізованим ферозондовим магнітометром. За величиною і характером зміни напруженості магнітного поля розсіювання H_r вимірюваного приладом над поверхнею контрольованого об'єкта, за спеціалізованими методиками визначають зони концентрації напружень (ЗКН), поверхневі та надповерхневі дефекти.

Рідкотекучість розплаву визначали згідно з ДСТУ 16438-70 "Форми піщана і металева для отримання проб рідкотекучості металів". Спиральну модель виготовляли за певними складами, а потім її ущільнювали з наповнювальним піском на вібростолі, після чого проводили її заливку.

Металографічні дослідження для оцінки якості та властивостей металевих матеріалів проводили на мікроскопі Альтамі ПОЛАР 3.

Хімічний склад досліджуваних зразків визначали за допомогою емісійного спектрометра ДФС-71 і рентгено-флюоресцентного аналізатора.

Аналіз глибини вуглецевого шару виконувався за допомогою програми аналізатора зображення Thixomet Pro. Для прогнозу й аналізу причин виникнення дефектів на стадії проєктування ливарної форми і ливниково-живильної системи використовувалася СКМ ЛП "NovaFlow".

Відомо, що до найперспективніших засобів розв'язання задач оптимізації є метод планування експерименту. Серед позитивних сторін цього методу - універсальність. До основних параметрів лиття за моделями, що газифікуються, належить склад полістиролової моделі (співвідношення будівельного і ливарного полістиролів). Як наповнювальну суміш використовували кварцовий пісок марки 1K02. Також важливим фактором є товщина шару нанесеної протипригарної фарби.

Виготовляли моделі циліндричної форми, їх заливали розплавом сталі 35Л і досліджували на предмет шорсткості та пригару. Результати базових експериментів наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Результати базових експериментів

Вміст ливарного полістиролу, %	Вміст будівельного полістиролу, %	Товщина шару протипригарного фарби, мм	Шорсткість виливки, мкм	Величина пригару, г/см ²
100	0	1	82	0,32
100	0	2	65	0,28
100	0	3	64	0,27
75	25	1	84	0,30

75	25	2	72	0,26
75	25	3	69	0,24
50	50	1	86	0,19
50	50	2	75	0,17
50	50	3	72	0,15
25	75	1	162	0,29
25	75	2	140	0,25
25	75	3	138	0,23
0	100	1	180	0,33
0	100	2	155	0,28
0	100	3	148	0,26

З базових експериментів визначено, що доцільним діапазоном дослідження складів є використання будівельного полістиролу до 50%, товщина шару протипригарної фарби 1-2 мм.

2.3. Планування експерименту та його аналіз

Математичне планування та обробку результатів експерименту проводили за методикою Малишева В.П..

Вивчалася величина шорсткості виливка (функція відгуку) зі сталі 35Л, виготовленої методом ЛГМ, залежно від вмісту будівельного пінополістиролу (x_1) і товщини протипригарної фарби на моделі (x_2), .

Під час дослідження впливу відсоткового вмісту пінополістиролів різних марок і товщини протипригарного покриття було обрано такі межі:

- ✓ для будівельного пінополістиролу від 10 до 90%;
- ✓ товщина протипригарного покриття від 1,25 мм до 2,25 мм.

У таблиці 2.3 наведено всі комбінації параметрів для 25 дослідів процесу виготовлення деталей методом ЛГМ, і вказано функцію відгуку, а саме шорсткість виливки та величину пригару на ній.

Таблиця 2.3

Матриця експерименту

x_1	x_2	Результат експерименту (шорсткість виливки), y_e	Результат експерименту (величина пригару), y_e
15	1,25	43	0,25
15	1,75	42	0,198
15	1,5	42	0,195
15	2,25	40	0,13
15	2	41	0,135
45	1,25	40	0,25
45	1,75	39	0,15
45	1,5	39	0,15
45	2,25	38	0,111
45	2	36	0,12

30	1,25	39	0,21
30	1,75	38	0,175
30	1,5	38	0,18
30	2,25	36	0,118
30	2	37	0,12
75	1,25	59	0,36
75	1,75	56	0,225
75	1,5	57	0,23
75	2,25	53	0,225
75	2	54	0,23
60	1,25	54	0,25
60	1,75	51	0,18
60	1,5	52	0,18
60	2,25	49	0,17
60	2	50	0,175

У таблицях 2.4 і 2.5 наведено експериментальні значення частинних функцій (шорсткість виливки та величина пригару відповідно).

Таблиця 2.4

Експериментальні значення приватних функцій (шорсткість виливки)

Функція	Рівень					Середнє значення
	1	2	3	4	5	
y_1	41	37	38	51	54,8	44,36
y_2	48,2	45,8	45,8	41,6	40,4	44,36

Таблиця 2.5

Експериментальні значення частинних функцій (величина пригару)

Функція	Рівень					Середнє значення
	1	2	3	4	5	
y_1	0,1816	0,1606	0,1562	0,191	0,254	0,1887
y_2	0,264	0,187	0,1856	0,156	0,1508	0,1887

Під час вибірки на всі п'ять рівнів кожного фактора використовується всі 25 значень експерименту. Це означає, що середнє значення п'яти рівнів кожної функції дорівнює загальній середній, у разі шорсткості виливки 44,36 і для величини пригару 0,1887.

Збіг середнього значення кожної функції із загальним середнім є критерієм відсутності помилки в розрахунках як тієї, так і іншої величини, тому обчислення цих середніх є обов'язковим.

За результатами математичного планування отримано два рівняння: залежність шорсткості поверхні від вмісту будівельного пінополістиролу та товщини антипригарного покриття:

$$x = -0,0001a^3 + 0,056a^2 - 2,373a + 65,56, \quad (2.1)$$

де а - вміст будівельного пінополістиролу

$$x = -7,92b + 58,22 \quad (2.2)$$

де b - товщина атипригарного покриття.

З метою перевірки адекватності цих залежностей підставимо значення, що забезпечують мінімальне значення шорсткості (відсоток вмісту будівельного пінополістиролу і товщина антипригарного покриття).

Після перевірки виходить значення близьке до цільового (44,36), тим самим можна прийняти адекватним це рівняння.

$$x = -0,0001a^3 + 0,056a^2 - 2,373a - 7,92b + 123,78 \quad (2.3)$$

де x - шорсткість поверхні, мкм;

а - вміст будівельного пінополістиролу, %;

b - товщина шару протипригарної фарби, мм.

За результатами математичного планування отримано два рівняння: залежність величини пригару на поверхні виливки від вмісту будівельного пінополістиролу і товщини антипригарного покриття:

$$y = 0,0024a + 0,0775 \quad (2.4)$$

де а - вміст будівельного пінополістиролу

$$y = 0,1319b^2 - 0,5646b + 0,7563, \quad (2.5)$$

де b - товщина атипригарного покриття.

y - величина пригару, г/см³ ;

З метою перевірки адекватності цих залежностей підставимо значення, що забезпечують мінімальне значення пригару (відсоток вмісту будівельного пінополістиролу і товщина антипригарного покриття).

Після перевірки виходить значення близьке до цільового (0,26), тим самим можна прийняти адекватним це рівняння.

$$y = -0,0024a + 0,1319b^2 - 0,5646b + 0,8338 \quad (2.6)$$

де y - величина пригару на поверхні виливки (г/см³); а - вміст будівельного пінополістиролу (%); b - товщина покриття (мм).

Висновки до розділу

1. За результатами математичного планування визначено два теоретичних рівняння:

- ✓ залежність шорсткості поверхні відливи від вмісту будівельного пінополістиролу в складі моделі та товщини протипригарного покриття;
 - ✓ залежність величини пригару виливки від вмісту будівельного пінополістиролу в складі моделі та товщини антипригарного покриття.
2. Зміна складу моделі зумовлює необхідність визначення технологічних режимів заливки (температура заливки, швидкість заливки, площа і кількість випорів) і розроблення складу протипригарної фарби.

РОЗДІЛ 3.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ ОТРИМАННЯ ЯКІСНОГО ЛИТВА

3.1. Дослідження макроструктури та властивостей полістиролу

Як показано [31], з погляду вигорання і зниження глибини науглецьованого шару сталевих виливків технологічно правильно використовувати найменш щільний полістирол.

Фактична щільність пінополістиролу для марки ППС-10 становить 15 кг/м^3 , для марки ППС-20 - 25 кг/м^3 і т.д. Очевидно, що чим вища щільність пінополістиролу, тим нижча його пористість, тим гірша здатність цього матеріалу до горіння.

У зв'язку з цим було вивчено пористу будову марок ППС-10, ППС-20 і ППС-30, як найпоширеніших і використовуваних під час ЛГМ. У таблиці 3.1 представлені основні властивості досліджуваних марок полістиролу.

Таблиця 3.1

Основні властивості досліджуваних марок полістиролу

Марка	Щільність, кг/м^3	Межа міцності, МПа	Час згорання при температурі 1200°C , сек
ППС-10	15	0,05	3,7
ППС-20	25	0,1	4,0
ППС-30	35	0,16	5,2

Дослідження пористої структури проводили за допомогою методу ртутної порометрії. Цей метод дає змогу визначати пори радіусом до 0,2 нм, виявити розподіл пор за розмірами, визначити відкриту пористість і побічно судити про форму пор.

В результаті дослідження встановлено, що характер розподілу пір у зразках має різний характер. Найменша відкрита пористість присутня у зразку ППС-30, сумарна величина становить $16,51 \text{ мм}^3/\text{г}$, величина доступної поверхні - $0,015 \text{ м}^2$. Загальна відкрита пористість становить 38%.

У зразках ППС-20 і ППС-10 характер розподілу пор практично однаковий. Відкрита пористість становить в обох випадках близько $260 \text{ мм}^3/\text{г}$, величина доступної поверхні збільшується до $0,105 \text{ м}^2/\text{г}$, загальна відкрита пористість становить 49%.

У дослідженнях [34] вказується, що поверхню полістиролових моделей, яка бере участь у тепломасообмінних процесах, у середньому становлять пори радіусом від 2 нм і вище, що дають змогу проникати молекулам CO_2 , які утворюються внаслідок вигорання пінополістиролу (у розглянутих випадках уся поверхня пір бере участь у процесі).

Виходячи з отриманих характеристик, можна однаковою мірою рекомендувати полістирол марок ППС-10 і ППС-20 для виготовлення моделей, тому що їхня пориста структура, а, отже, і процес вигорання

практично ідентичні.

Останнє припущення підтверджено експериментально. Однакові за розмірами шматки полістиролу марок ППС-10 і ППС-20 піддавалися випробуванням на час згоряння. Процес горіння проводили в атмосфері повітря в замкнутому просторі, що відповідає реальним умовам. Запалювання відбувалося в результаті контакту з розплавом (температура розплаву становила 1620°C). Час повного згоряння становив 4,5 і 5,8 сек відповідно. Час на вигорання моделі на 15-20% вищий за заявлений у сертифікаті [34], що необхідно враховувати при складанні технологічної карти процесу.

З урахуванням проведених досліджень можна рекомендувати як марки модельних будівельних полістиролів марки ППС-10 і ППС-20.

З марок ливарного полістиролу можуть використовуватися для виготовлення моделей ПСВ-1Л і ПСВ-2Л, властивості яких наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Властивості ливарного полістиролу для спінювання

Показники	ПСВ-1Л	ПСВ-2Л
Масова частка води, % не більше	1,0	
Відносна в'язкість	1,8	
Кількість пороутворювача, % не менше	5,0	
Гранулометричний склад, середній діаметр гранул, мм	0,7-1,0	1,0-1,6
Об'ємна щільність, кг/м ³	35-40	25-35

Часто виготовлення газифікованих моделей у ливарному виробництві здійснюється механічною обробкою з пінополістирольних плит, одержуваних як із ливарних, так і з будівельних марок суспензійного полістиролу. У таблиці 3.3 наведено властивості пінополістиролу в плитах із різних марок спіненого полістиролу.

Таблиця 3.3

Основні властивості моделей із полістиролу різних марок

Показники	ПСВ-1Л	ПСВ-2Л
Об'ємна маса, кг/м. ³	25	20
Межа міцності на стиск, кгс/см ²	1,3-1,5	1,1-1,5
Повнота вигорання, г/кг, при 1200 °C	2,1-2,2	2,8-2,9

До недоліків спіненого полістиролу слід віднести його схильність до грудкування (злипання). Вона виникає внаслідок електростатичної або хімічної взаємодії між окремими гранулами. Усе це значно ускладнює заповнюваність прес-форми гранулами.

Для усунення цих недоліків і виготовлення моделей у роботі застосовували ливарний полістирол дрібних фракцій 0,7-1,0 мм, а також будівельний пінополістирол розміром 1-3 мм в об'ємі до 40-45% (що визначалося розмірами моделі).

Полістирол спочатку підспінювався парою і просушувався. У прес-

форми вдувався вже спінений полістирол, потім прес-форми, заповнені полістиролом, поміщали в автоклав і витримували до повного спікання гранул. Потім охолоджують і дістають готові моделі.

Можливо використовувати й інший спосіб виготовлення моделей - на модельних автоматах, що підвищує продуктивність у 2-4 рази. Моделі збираються в блоки (кущі) склеюванням, або припаюються. Фарбування блоків моделей здійснюють в 1 шар спеціальним протипригарним покриттям шляхом занурення у ванну, або в разі складної конфігурації виливків, обливом. Сушка пофарбованих блоків проводиться в камері за температури 40-60°C протягом 2-3 годин.

Дана технологія виготовлення і складання моделей дає змогу застосовувати дешевший полістирол, що містить до 40% вторинного пінополістиролу з відходів будівельного пінополістиролу для складних поверхонь, не потребує виготовлення шаблонів і застосування спеціальних верстатів, а також отримувати поверхні моделей з низькою шорсткістю, підвищує продуктивність і точність виготовлення моделей.

Спінювання парою гранул полістиролу проводиться при температурі 95-105°C статичним способом в автоклаві. За статичного способу гранули рівномірним шаром засипають у деку з днищем із мідної сітки, яке поміщають у бак над киплячою водою. Бак закривається кришкою, внаслідок чого температура пари над киплячою водою стабілізується в межах 96-98°C.

Дослідження поверхні будівельного і ливарного полістиролу показали, що одержуваний спінений будівельний полістирол має більш гладку поверхню. Дослідження проводили зі збільшенням у 100 разів. (рисунок 3.1)



Рисунок 3.1 - Структура моделі комплексного складу: 40% будівельного полістиролу марки ППС-20; 60% ливарного полістиролу марки ПСВ-1Л

У структурі спостерігається наявність великих зерен будівельного полістиролу і дрібних зерен ливарного полістиролу. Усе це призводить, з одного боку, до більш щільного укладання зерен, що позитивно позначається

на шорсткості майбутньої виливки. З іншого боку, низька щільність будівельного полістиролу впливапоказали, що найбільший об'єм пор перебуває в межах 20 мкм.

На рисунку 3.2 представлено гістограму для зразків різного складу, що відображає розмір пор і кумулятивну пористість у них.

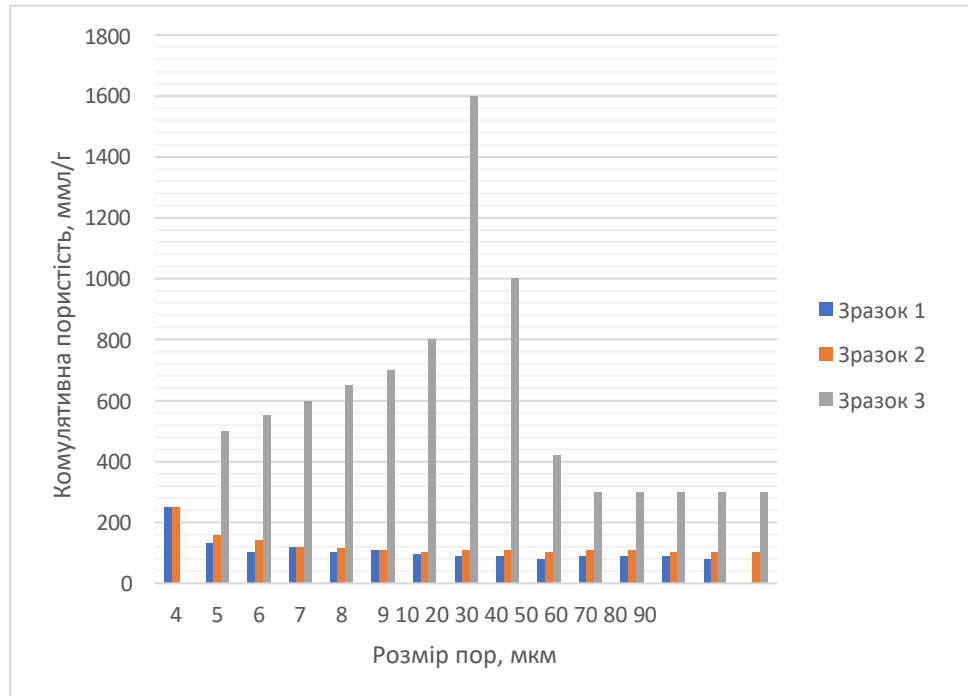


Рисунок 3.2 - Порівняльна гістограма пористості моделей різного????? складу.

Також в роботі досліджували повноту вигорання моделей із полістиролу з додаванням гранул будівельного полістиролу. Для цього зразок моделі виливки "Фланець" поміщали в термічну піч. Модель являла собою невеликий сегмент моделі масою 0,5 г.

Після витримки зразка при певній температурі протягом 30 секунд, тигель із залишками зразка витягали з печі та зважували, різниця між вагою тигля із залишками та без і показує сухий залишок від зразка моделі (рисунки 3.3, 3.4).



А

б

а - початковий зразок; б - після перебування в печі за температури 1200°C

Рисунок 3.3 - Зразок №1 (вміст гранул вторинного полістиролу 40%)

а

б



а - початковий зразок; б - після перебування в печі за температури 1200°C

Рисунок 3.4- Зразок №4 (вміст ливарного полістиролу 100%)

Також вплив на швидкість і повноту вигорання моделі має розмір гранул. Підготовка гранул полістиролу для спінювання є важливою частиною технологічного процесу і охоплює такі операції: класифікація гранулометричного складу, спінювання гранул, сушіння та активізація спієних гранул.

Гранулометричний склад полістиролу визначається залежно від товщини стінки моделі, тому що спієні гранули повинні не тільки заповнювати порожнину прес-форми, а й забезпечити необхідну об'ємну масу і якість її поверхні. У таблиці 3.4 наведено розміри вихідних гранул полістиролу залежно від товщини стінки моделі.

Таблиця 3.4

Рекомендований розмір гранул

Розміри гранул, мм	Об'ємна маса моделі, кг/м ³	Залишок при вигорянні при температурі 1200°C, г/кг
1,2-1,8	13-30	3,6-3,7
1,1-1,3	15-40	3,3-3,4
0,7-0,9	17-40	2,6-2,7
0,3-0,7	17-40	2,1-2,2

3.2.Визначення оптимального складу протипригарної фарби

Склад протипригарної спиртової фарби, що використовується нині, вказано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Склад використовуваної протипригарної фарби

Компоненти	Вміст, %
Водний розчин натрій карбоксиметилцелюлоза (Na-КМЦ) концентрації 30-35 г/см ³	48
Смола СФЖ - 309	11
Спирт гідролізний	6
Вогнетривкий наповнювач	35

До недоліків цього складу можна віднести тривалість її висихання після нанесення на модель, що призводить до зниження продуктивності. Крім того, наявність смоли погіршує санітарно-гігієнічні показники на робочому місці. Технологічним недоліком є відносно низька газопроникність. Так, дослідження газопроникності зразка комплексного складу з нанесеним покриттям складу, зазначеного в таблиці 3.5 товщиною 2 мм, дало результат 95 одиниць.

Відповідно до таблиці 3.6, спочатку, визначення компонентів протипригарної фарби для моделей комплексного складу проводили з точки зору шорсткості поверхні пофарбованої моделі (1,5 мм) і газопроникності. Надалі оцінювалася величина пригару виливки (таблиця 3.7).

Таблиця 3.6 - Склад використовуваної протипригарної спиртової фарби, що використовується

Склад, %	Газопроникність, од.	Шорсткість, мкм	Пригар, г/см
Пісок марки 1K02A - 50 Гідролізний спирт - 45 Полівінілбутираль - 5	109	45	0,15

Пісок марки 1K315A - 50 Гідролізний спирт - 45 Полівінілбутираль - 5	119	58	0,14
Пісок марки 1K02A - 15 Пісок марки 1K315A - 35 Гідролізний спирт - 45 Полівінілбутираль - 5	101	48	0,14
Пісок марки 1K02A - 35 Циркон - 15 Гідролізний спирт - 45 Полівінілбутираль - 5	115	32	0,11
Циркон - 15 Пісок марки 1K315A - 35 Гідролізний спирт - 45 Полівінілбутираль - 5	119	41	0,12
Пісок марки 1K02A - 35 Циркон - 15 Гідролізний спирт - 40 Полівінілбутираль - 10	116	49	0,13
Пісок марки 1K02A - 35 Циркон - 15 Гідролізний спирт - 48 Полівінілбутираль - 2	118	35	0,11
Пісок марки 1K02A - 35 Циркон - 15 Гідролізний спирт - 47 Полівінілбутираль - 3	117	30	0,10

Аналогічні дослідження швидковисихаючої спиртової фарби, пропонованого складу, представленого в таблиці 3.7, показали газопроникність 117 одиниць.

Таблиця 3.7 - Склад використовуваної протипригарної спиртової фарби, що використовується

Склад антипригарної фарби для сталевих виливків, мас (%)	
компонент	зміст
Наповнювач:	
пісок марки 1K02A	35%
циркон	15%
Гідролізний спирт	47%
Полівінілбутираль	3%
Щільність, г/см ³	
Кварцовий пісок марки 1K02A	3
Циркон	1,8-1,85

Крім того, наявність спиртової основи сприяє швидкому висиханню і, отже, підвищенню продуктивності.

Протипригарне покриття наносили на полістиролову модель за допомогою пульверизатора і пензля, за необхідності. Товщина покриття

варіювалася в межах 0,25-2,0 мм. Сушіння моделей із фарбою здійснювали в спеціальній сушарці в потоці гарячого повітря, час сушіння змінювали залежно від габаритів моделі від 2 до 5 год.

Шорсткість виливків визначали за товщини покриття моделі виливки 1,5 мм залежно від часу і температури сушіння. Визначено, що товщина шару протипригарної фарби на полістироловій моделі має бути прямо пропорційна пористості піщаної форми, температурі металу, що заливається, та його гідростатичному напору під час заливання. Чим більший металостатичний напір і температура металу під час заливання, тим більшою має бути товщина фарби за збереження її газопроникності. На рисунку 3.5 наведено розрахункові та експериментальні криві залежності шорсткості поверхні від товщини нанесеної фарби.

З графіка 3.5 видно, що зі збільшенням товщини шару фарби з 1,5 до 2,0 мм шорсткість поверхні практично не змінюється і становить 30-33 мкм, що є задовільним для поверхні виливка.

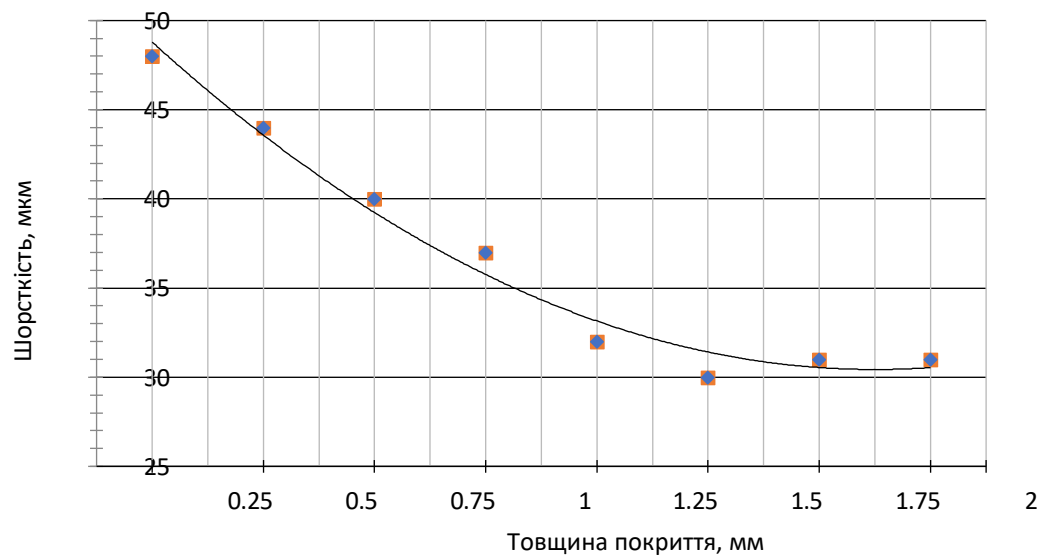
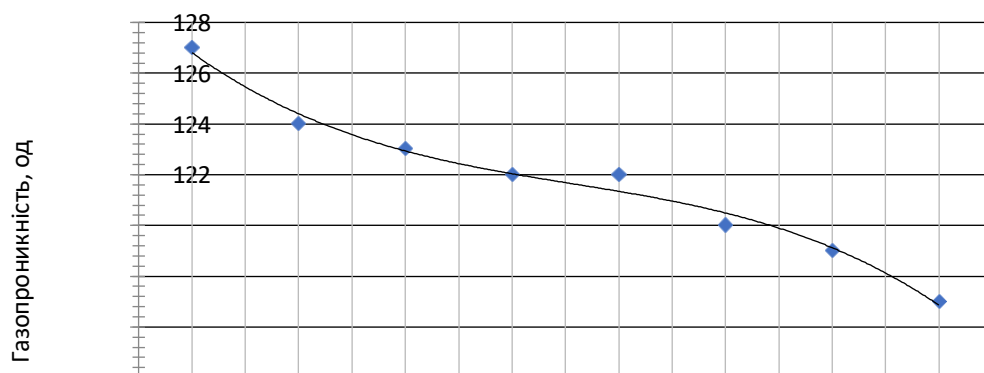


Рисунок 3.12 - Залежність шорсткості виливки від товщини шару антипригарної фарби

На рисунку 3.6 наведено залежність газопроникності моделі з фарбою залежно від товщини нанесеної фарби. Як і очікувалося, величина газопроникності обернено пропорційна товщині покриття. Однак загалом у досліджуваному діапазоні товщина покриття має незначний вплив на газопроникність у межах 115-130 од.



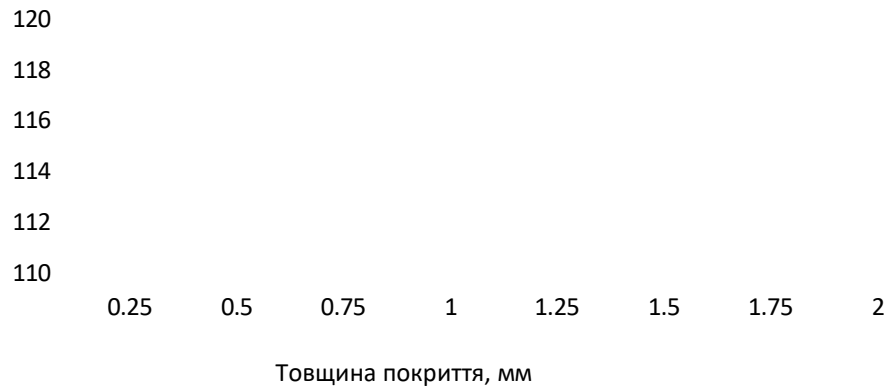


Рисунок 3.6- Залежність газопроникності моделі від товщини шару фарби на ній

Очевидно, що шорсткість закристалізованого виливка безпосередньо залежить від шорсткості моделі. Проведені дослідження підтвердили це положення. Як видно з рисунка 3.7, залежність шорсткості поверхні виливки від шорсткості поверхні моделі має майже лінійний характер і виражається залежністю $Rz = Rz_{\text{мод}} + (20...25 \text{ мкм})$.

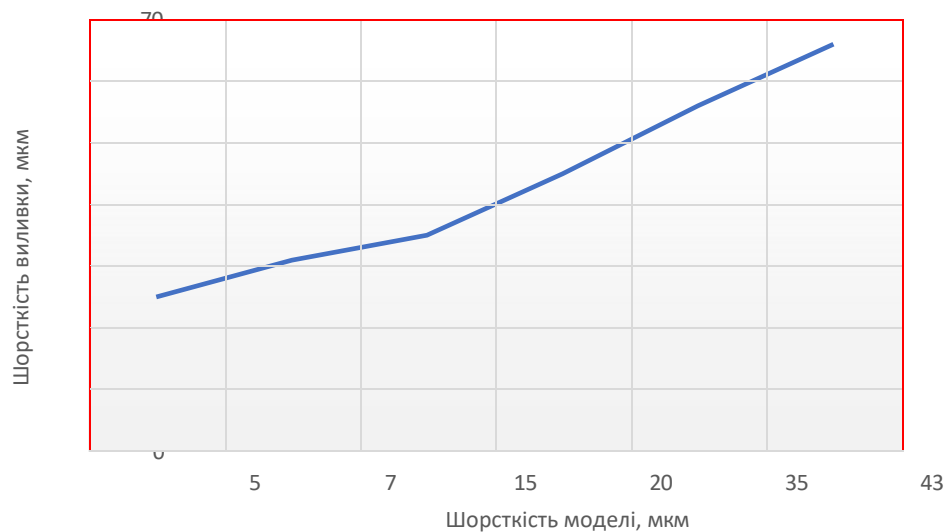


Рисунок 3.7 - Залежність шорсткостей виливків від моделей

Результати експериментальних даних щодо визначення залежності величини пригару виливка від товщини шару фарби на полістироловій моделі показано на рисунку 3.8. У межах 1,25-1,75 мм товщини фарби величина пригару є мінімальною та становить $0,14 \text{ г/см}^2$.



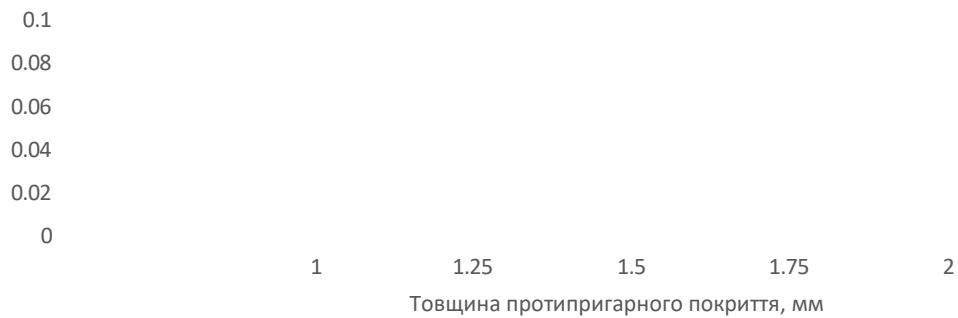


Рисунок 3.8- Залежність величини пригару від товщини шару фарби на полістироловій моделі

Також були побудовані графіки, що описують залежність шорсткості виливка від вмісту будівельного пінополістиролу в моделі (рисунок 3.9). З графіка випливає, що найбільш оптимальним складом моделі є співвідношення 60% ливарного до 40% будівельного пінополістиролу.

Таким чином, пропонується склад фарби доцільно наносити на поверхню моделі товщиною 1,25-1,75 мм.

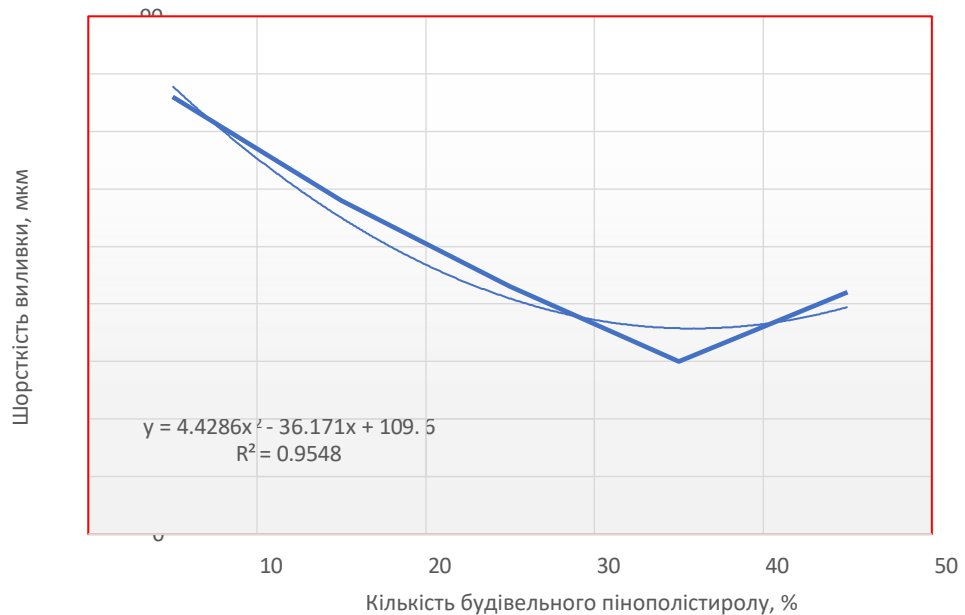


Рисунок 3.9 - Графік залежності шорсткості виливки від вмісту будівельного пінополістиролу

Цікаво проявляється вплив часу сушіння фарби на величини шорсткості поверхні. Досліджуваний часовий інтервал становив 2-5 год. Температура сушіння підтримувалася постійною і становила 55°C. Зі збільшенням часу сушіння до 3-3,5 год шорсткість поверхні зменшується, потім після 3,5 год починає зростати. Цей факт можна пояснити вигоранням компонентів фарби та пов'язаною з цим поверхневою деструкцією, що негативно впливає на чистоту поверхні виливки. Таким чином, проведені дослідження показали, що оптимальними параметрами під час виготовлення виливків деталей гірничо-шахтного устаткування методом ЛГМ із використанням моделі, що містить

гранули будівельного полістиролу, є такі: товщина антипригарного покриття 1,5-2,0 мм; час сушіння 3-3,5 год; температура сушіння 55°C.

3.3. Оптимізація конструкції модельно-опічного оснащення

Дуже важливим аспектом під час ЛГМ є конструкція самої опоки і послідовність циклу формування, який включає в себе:

а) подачу очищеного піску в опоку, при цьому температура піску має бути не більше 40°C, а вміст пиловивідних частинок не більше 8%;

б) створення піщаної "постілі" в опоці;

в) контроль формувальником моделі або модельного блоку на відсутність відшарувань протипригарного покриття, щілин у місцях склеювання частин моделі, стояка, живильників, надливів;

г) встановлення моделі або модельного блоку в опоку на "постіль";

д) пошарове засипання опоки з віброущільненням для заповнення піском порожнин моделі;

е) герметизація опоки з установкою ливарної чащі, а також захисного шару піску на герметизуючу плівку від пропалу краплями рідкого металу під час заливання, як герметизуючу плівку використовують простий целофан;

ж) транспортування опоки на заливальний плац і підключення до рукава вакуумної системи з подальшим увімкненням вакуумного насоса на період заливки з витримкою 0,5-5 хв до затвердіння виливки. Час витримки залежить від складності виливка і кількості виливків у куці, тому тут дуже важливу роль відіграє конструкція вакуумованої опоки.

Основним завданням конструювання опоки є забезпечення вище зазначених функцій з мінімальними витратами. Для вакуумування продуктів газифікації полістиролової моделі комплексного складу було розроблено та випробувано кілька конструкцій вакуумованих опок.

На рисунку 3.10 представлена використовувана нині вакуумована опока з нижнім забором повітря.

Стінки цієї опоки виготовлені з листа товщиною 8 мм, по контуру стінки опоки посилені двома рядами куточка, дно виготовлено з листа 10 мм. На дні встановлено чотири сітки, які захищені листами з отворами, через які проходить повітря. Конструкція даної опоки має низку недоліків, за жорсткістю задовольняла технологічний показник, проте одним із недоліків опоки є те, що дрібні частинки піску, які несуть газу деструкції, потрапляючи до каналів разом із конденсацією газоподібних продуктів пінополістиролу, згодом різко зменшують прохідний переріз, що зі свого боку призводить до збільшення браку (металевий пригар, земляний пригар, недоливи тощо).

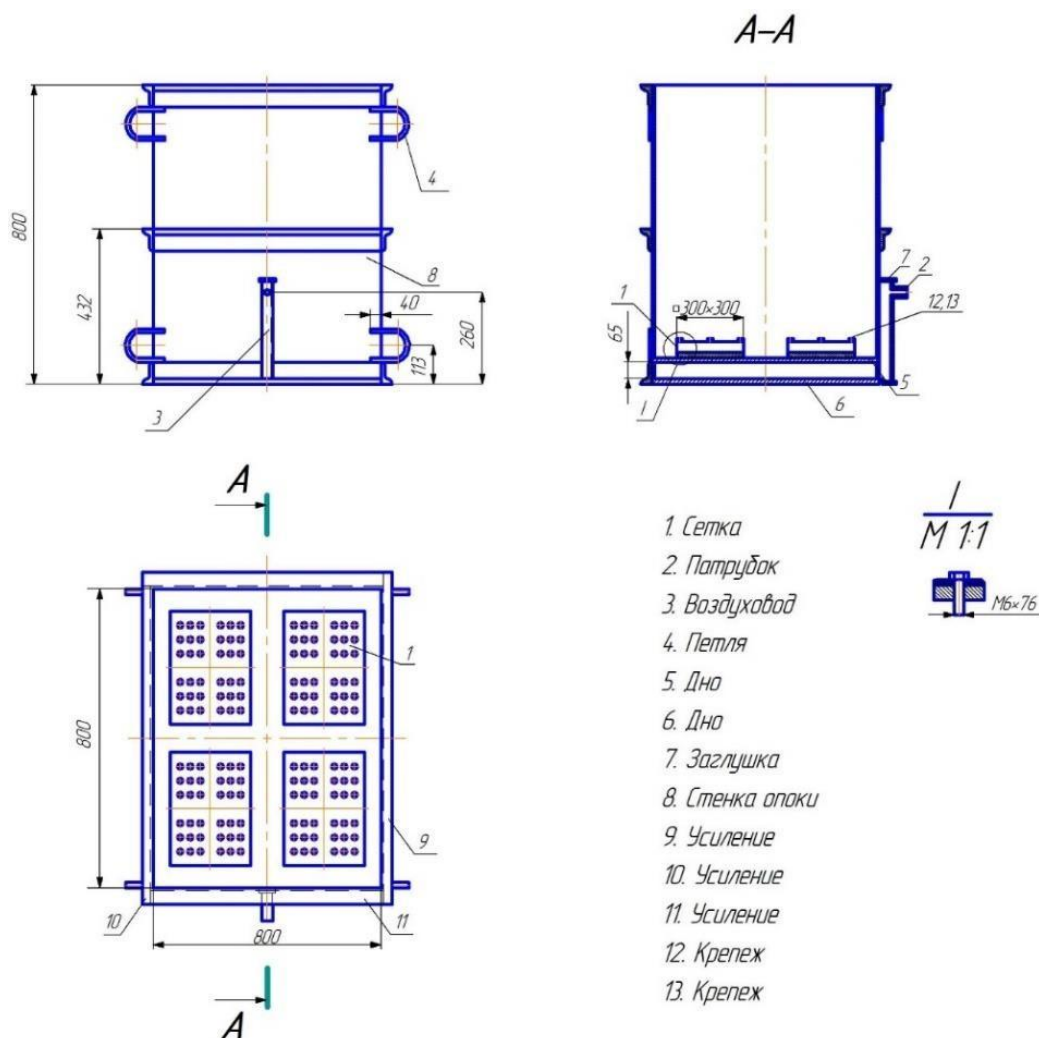


Рисунок 3.10 - Схема знімання вакуумованої опоки з нижнім забором

повітря Для запобігання погіршенню умов відкачування повітря,

доводилося

регулярно розбирати, очищати канали та міняти сітки. Дана конструкція опоки не складна у виготовленні і не дорога, але в експлуатації трудомістка і основним недоліком даної конструкції є те, що забір газів відбувається знизу. Це призводить до нерівномірного вакуумування по поверхні моделі або по загальному піску, що погіршує екологію і якість виливка.

Для усунення цих недоліків, була запропонована нова конструкція вакуумованої опоки (рисунки 3.11, 3.12).

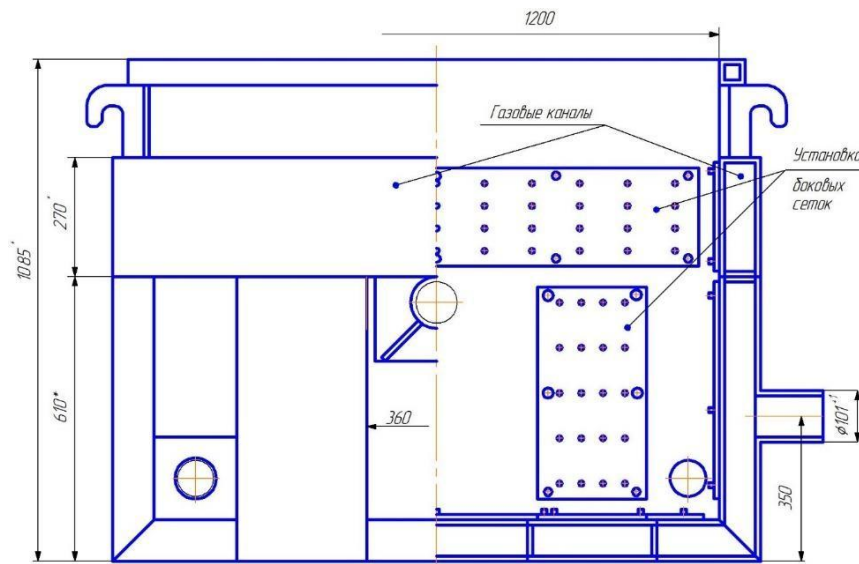


Рисунок 3.11 - Схема вакуумованої опоки з боковим і нижнім забором повітря



Рисунок 3.12 - Вакуумована опока з бічним і нижнім забором повітря

Газові канали було запропоновано розташувати не тільки на дні опоки, але, і на бічних стінках опоки. Трудомісткість виготовлення і вартість опоки значно збільшилася, але при цьому якість виливків покращилася. Стінки опоки були виготовлені з листової сталі товщиною 6 мм, дно подвійне з листової сталі товщиною 8 мм. При цьому збільшилася кількість газових каналів, які виготовлялися з листової сталі завтовшки 5 мм, що зі свого боку слугують посиленням для бічних стінок.

Брак виливків у такій конструкції опок знизився до 2-3%, проте залишилася проблема засмічення газових каналів і зменшення прохідного перетину, що впливає на умови газів. Для розв'язання цієї проблеми доводиться регулярно розбирати, очищати канали та міняти сітки. Це спричиняє великі трудовитрати і збільшує вартість опочного оснащення. Для розв'язання задачі запропоновано ще одну конструкцію (рисунок 3.13).

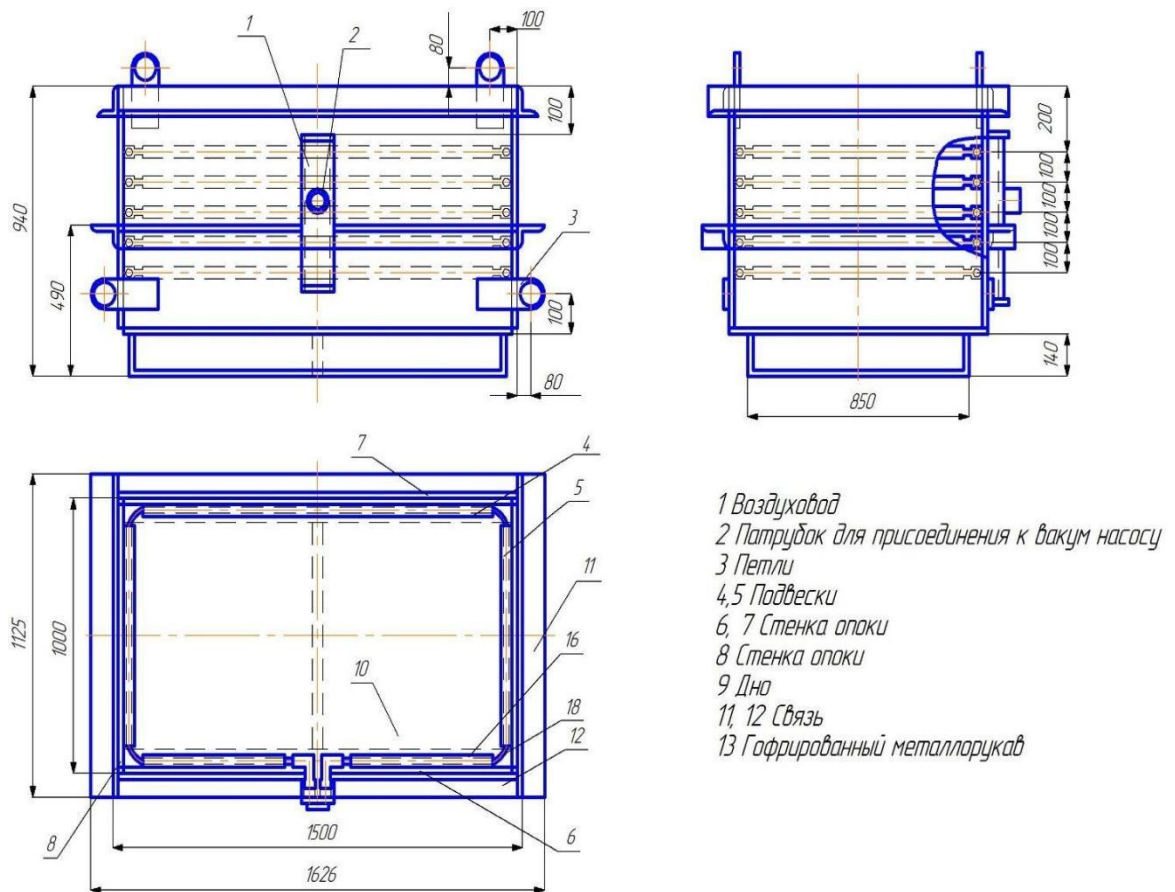


Рисунок 3.13 - Вакуумована опока з гофрованим металорукавом

Розмір опоки 1500×1000×800 мм, вона зроблена з листа завтовшки 6 мм, дно з листа 8 мм, причому дно подвійне, що покращує віброуцільнення і дає змогу опоку переміщати по рольгангу. Забір повітря здійснюється за допомогою гофрованого металорукава. Застосування металорукава дало змогу розв'язати проблему засмічення повітропроводів, гнучкість металорукава дає змогу розташувати його по периметру моделі (модального куща), до того ж у кілька рядів. Найоптимальніший варіант - це 5 рядів із відстанню між рядами 100 мм, і час вакуумування становить від 1 до 3-х хвилин, це залежить від розміру моделі та кількості моделей "у куші".

Переваги цієї конструкції вакуумованої опоки полягають в такому:

1. Простота виготовлення.
2. Забір повітря здійснюється через міжвиткові щілини, при цьому металорукав не засмічується.
3. Збільшується відкачуваність газів, що визначає вихід якісних виливків (брак, як засвідчили експерименти, становить не більш як 2-3%) без науглецювання і газових раковин
4. Ці опоки можна використовувати для отримання виливків різної ваги зі складними формами.
5. Дно опоки подвійне з товстого листа, що забезпечує рівномірний контакт з плитою вібростола, а також є можливість переміщати по рольгангах.

3.4. Дослідження структурно-механічних властивостей пісків

Важливою складовою процесу ЛГМ є використання наповнювальних пісків, оскільки через них здійснюється вакуумування форми та відведення компонентів, що газифікуються, а також, безпосередньо взаємодіючи з розплавом, формують поверхню виливка на предмет геометрії, пригару, шорсткості.

У роботі проведено такі дослідження:
зміна об'ємної густини піску у залежності від часу ущільнення
зміна пористості та газопроникненості піску у залежності від об'ємної густини, віброущільнюваність піску,

Досліджувалися 5 поєднань двох марок піску:

1. 1K02 - 100%.
2. 1K016 - 100%.
3. 1K02 - 70%, 1K016 - 30%.
4. 1K02 - 30%, 1K016 - 70%.
5. 1K02 - 50%, 1K016 - 50%.

Єдиним способом ущільнення ливарної форми з сипучих матеріалів під час ЛГМ є динамічне ущільнення вібрацією або струшуванням. Віброущільнення сипучих матеріалів залежить від маси матеріалу і прискорення частинок під час вібрації, яке визначають інерційні сили.

Дослідження показали, що ущільнюваність піску не залежить від напрямку вектора коливання і за постійної частоти залежить тільки від амплітуди. Диференціальне рівняння віброущільнення сипучих матеріалів має вигляд:

$$d\varepsilon/dn = \beta(\varepsilon - \varepsilon_{\infty}), \quad (4.2)$$

де n - відношення прискорення коливань до прискорення сили тяжіння;

ε_{∞} - пористість при граничному ущільненні ґрунту;

β - коефіцієнт віброущільнюваності піску.

У таблиці 3,8 наведені значення, отримані дослідним шляхом. Усі значення показані на залежності коефіцієнта пористості від віброущільнюваності на рисунку 3.14.

Таблиця 3.8 - Дослідження віброущільнюваності піску

Коефіцієнт пористості, E	Число обертів, $n=a/g$
0,83	0
0,78	1
0,73	1,75
0,67	2,5
0,64	3,26

0,59	4,5
0,55	7,32
0,54	10

Розрахункова лінія регресії (крива 2) побудована за рівнянням

$$y = -0,0432x + 0,8607$$

з коефіцієнтом достовірності $R^2 = 0,983$.

На рисунку 3,14 наведено залежності віброущільнюваності піску від відношення прискорення вібрації α до прискорення сили тяжіння g .

Прискорення вібрації α визначається за формулою (4.3):

$$\alpha = A\omega^2 = A(\pi n/30)^2 \quad (4.3)$$

де A - амплітуда;

ω - кутова частота коливань;

n - число обертів за хвилину.

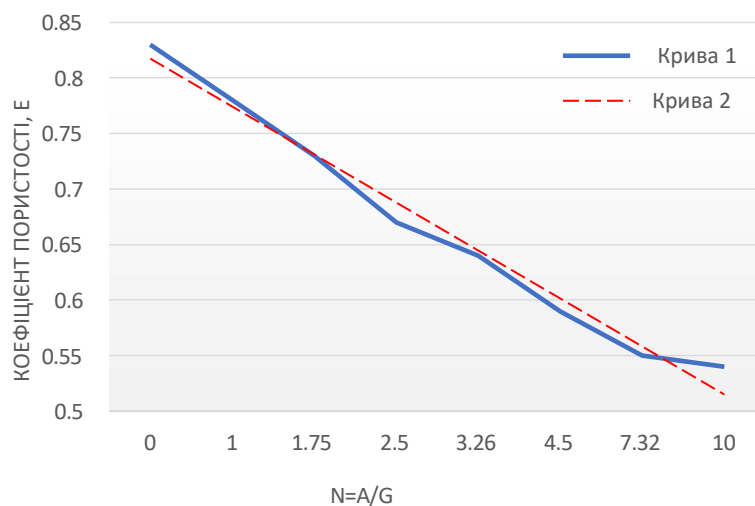


Рисунок 3,14 - Графік віброущільнюваності піску

З отриманих даних випливає важливий висновок: максимальне ущільнення форми досягається за співвідношення між прискоренням вібрації та силою тяжіння, що дорівнює 6 і більше. Це дає можливість за формулою (4.4):

$$n = 6 = A \omega^2 / g, \quad (4.4)$$

підбирати необхідну частоту й амплітуду вібрації для отримання максимальної щільності форми з піску під час ЛГМ. За частоти коливань 50 Гц оптимальна амплітуда становить 0,6 мм.

На графіку 3.14 також показано експериментальну лінію регресії (крива 1).

На рисунку 3.15 представлена залежність пористості піску використовуваної марки від об'ємної густини. Усі отримані результати занесені в таблицю 3.9.

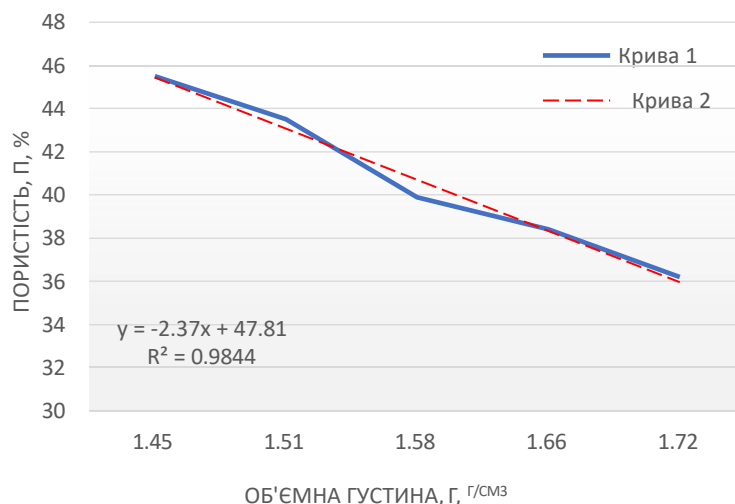


Рисунок 3.15 - Графік залежності пористості піску від об'ємної густини

На графіку показано експериментальну лінію (крива 1). Розрахункова лінія регресії (крива 2) побудована за рівнянням

$$y = -2,37x + 47,81$$

з коефіцієнтом достовірності $R^2 = 0,9844$.

З цього випливає, що пісок має мінімальну пористість через збільшений вміст глинистої складової.

Таблиця 3.9 - Залежність пористості піску використовуваної марки від об'ємної густини

Склад	Пористість, П, %	Об'ємна густина, γ , г/см³
1K02	45,5	1,45
1K016 - 30% 1K02 - 70%	43,5	1,51
1K016 - 50% 1K02 - 50%	39,9	1,58
1K016 - 70% 1K02 - 30%	38,4	1,66
1K016	36,2	1,72

Очевидно, що значне падіння пористості і, як наслідок, газопроникності, спостерігається за використання пісків дрібної фракції понад 50%.

Газопроникність піску залежно від густини представлено на рисунку 3.16. Усі значення наведені в таблиці 3.10. Пісок із більшою пористістю має і більшу газопроникність.

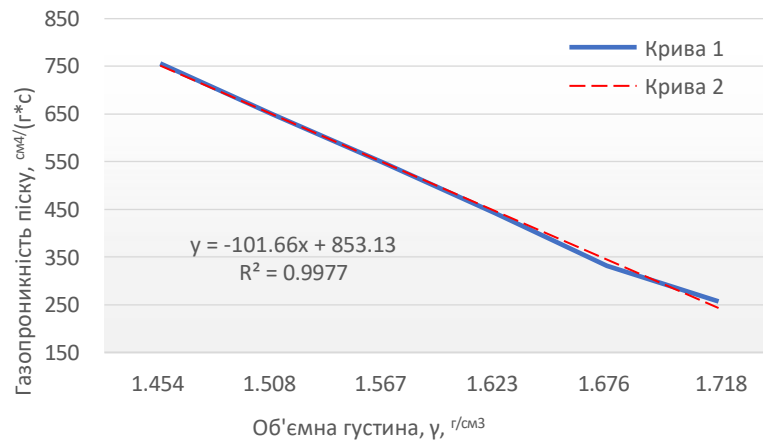


Рисунок 3.16 - Графік залежності газопроникності від густини піску Таблица

Таблица 3.10 - Газопроникність піску залежно від густини

Газопроникність піску К, см ⁴ /(г*с)	Об'ємна густина γ, г/см ³
756	1,454
650	1,508
548	1,567
442	1,623
331	1,676
257	1,718

На графіку (рисунок 3.16) показано розрахункову лінію регресії (крива 2) побудована за рівнянням

$y = -101,66x + 853,13$ з коефіцієнтом достовірності $R^2 = 0,9977$.

Зміна густини піску залежно від часу вібрації наведено на на рисунку 3.17 де видно, що пісок добре ущільнюється вібрацією і вже через 25-30 секунд досягає його максимальної густини. Значення наведено в таблиці 3.11.

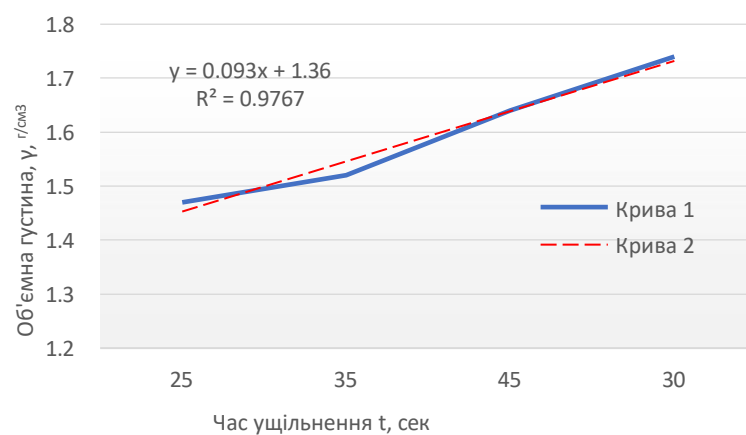


Рисунок 3.17 - Графік зміни густини піску залежно від часу вібрації

На графіку (рис. 3.17) показано розрахункову лінію регресії (крива 2) побудовану за рівнянням

$$y=0,093x + 1,36 \text{ з коефіцієнтом достовірності } R^2 = 0,9767.$$

Таблиця 3.11 - Зміна густини піску залежно від часу вібрації

Марка піску	Об'ємна густина γ , г/см ³	Час ущільнення t , сек
1K02	1,47	25
1K016	1,52	35
1K016 - 70% 1K02 - 30%	1,64	45
1K016 - 30% 1K02 - 70%	1,74	30

Структурно-механічні властивості піску залежать від мінералогічного складу, розміру і форми зерен, вологості. Глиниста складова зменшує газопроникність піску, волога збільшує напруження зсуву, оскільки з'являються сили зчеплення. Вологі глинисті піски погано ущільнюються вібрацією і мають низьку газопроникність. Тому для ливарної форми застосовують малоглинисті (менш як 2% глини) піски. Структурно-механічні та технологічні властивості таких пісків залежать головним чином від гранулометричного складу і форми зерна.

Висновки з розділу

1. апропоновано комплексний склад полістиролової моделі:
Будівельний полістирол ППС-20 - 40%. Розмір гранул - 2-3 мм.
Ливарний полістирол ПСВ-1Л - 60%. Розмір гранул - 0,7-1,0 мм.

Такий склад дешевше традиційного використовуваного ливарного полістиролу і має задовільну газопроникність і більш низьку щільність, що сприяє зменшенню глибини науглецьованого поверхневого шару сталевих виливків.

Порівняно з ливарним полістиролом у моделі комплексного складу менша щільність на 15%, вища газопроникність на 20%.

2. Запропоновано склад швидковисихаючої фарби для комплексного складу полістиролової моделі. Наповнювач: пісок марки 1K02A - 35%, циркон - 15%, гідролізний спирт - 46,8%, полівінілбутираль - 3,2%. Оптимальна товщина нанесення фарби з точки зору її витрат, шорсткості та пригару виливків - 1,25-1,75 мм. Газопроникність моделі за товщини покриття фарбою в 2 мм становить за новою фарбою 117 од., за базовою - 95 од. Час сушіння відповідно 1,5 години і 3,5 години.

3. Для запобігання погіршення умов відкачування повітря і рівномірного вакуумування форми запропоновано нову конструкцію вакуумованої опоки з розташуванням газових каналів не тільки на дні опоки, а й на її бічних стінках.

4. Запропоновано як наповнювач використовувати піски марок 1K02 і 1K016 у співвідношенні 70 на 30. Таке поєднання демонструє найоптимальнішу

щільність і мінімальний час ущільнюваності за умов збереження технологічно необхідної газопроникності.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЛИТТЯ ВИЛИВКІВ

4.1. Дослідження впливу технологічних параметрів заливки на властивості виливків

Розглядався процес заливки деталі "Колесо ходове" сталлю 35Л литтям за газифікованими моделями за пропонованою технологією. Хімічний склад сплаву наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Хімічний склад 35 Л

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
0,32-0,4	0,2-0,52	0,4-0,9	до 0,3	до 0,045	до 0,04	до 0,3	до 0,3	~97

Маса виливки "Колесо" становить 25 кг. З урахуванням ливникової системи маса розплаву на одну форму становить 27,5 кг. Основними технологічними режимами заливки ливарних форм є температура сплаву і швидкість заливки.

Швидкість заливки впливає на глибину науглецювання сталевих виливків, на швидкість газифікації моделі, водночас повільне заливання може призвести до охолодження розплаву та недоливів, а швидка швидкість заливки призведе до підвищеної пористості, оскільки продукти деструкції можуть не встигати видалятися з порожнини виливки [30].

Щодо температури заливки відомо, що у виливку перегрів знімається доволі швидко; водночас протікає початкова стадія затвердіння, що характеризується дуже швидким просуванням межі затвердіння від поверхні до центру. Протягом основної стадії межа затвердіння просувається з уповільненням до осі виливки. Розподіл температури у формі поступово вирівнюється, наближаючись до лінійного. Після завершення затвердіння виливки вона разом із формою охолоджується вже як єдина система. На межі виливки і форми існує градієнт температур.

За ГОСТ16438-70 проводили дослідження рідкотекучості сталі 35Л. Визначено, що рідинноплинність зразків зі зниженим вмістом вуглецю за обох порівнюваних температур заливки на 6-8% вища, ніж у зразка із вмістом вуглецю за верхньою межею (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 - Порівняння рідинноплинності сталі 35Л у зразок полістиролу ливарної марки, будівельної та комплексного складу

Заповнюваність проби, %			Температура заливки, °C
ПСВ-1Л	ППС-20	комплексний склад	
97	89	97	1560
94	82	93	1520

Дослідження рідинноплинності показали доцільність використання

моделей комплексного складу для ливарних сплавів. Очевидно, що використання тільки будівельного полістиролу внаслідок наявності великої кількості газів, що газифікуються, ускладнює рух розплаву, призводить до сповільнення його швидкості та передчасного утворення скоринки на поверхні фронту руху розплаву. У той час як швидкість і повнота вигорання та швидкість видалення продуктів газифікації полістиролу комплексного складу співставні з показниками ливарного полістиролу.

Наявність твердого залишку також впливає на рідинноплинність сплаву і, як наслідок, на якість виливки, її геометричну точність і розміри.

Досліджували рідкотекучість сталі при використанні моделі з комплексним складом. Дослідження рідиннотекучості проводили за ГОСТ 16438-70.

Визначено, що рідинноплинність сталі під час використання пропонованого складу моделі на 5-10% вища, ніж у моделі з суто ливарного складу (таблиця 4.3), що свідчить про більш низьку кількість пароподібних елементів, що утворюються, і твердого залишку.

Таким чином, дослідний склад моделі дає змогу виготовляти виливки з більш тонкими стінками і складною конфігурацією.

Таблиця 4.3 - Рідкотекучість сталі при використанні різних складів моделей

Заповнюваність проби на основі моделі, %		Температура заливки, °C
ливарний полістирол	комплексний склад моделі	
89	93	1520
93	98	1560
97	100	1600
100	100	1640

Повна заповнюваність форми з комплексним складом моделі з нижчою температурою (приблизно на 40°C) дає змогу використовувати менше енергії на приготування розплаву, і цей факт також сприяє зниженню собівартості кінцевої продукції.

Також оцінювали вплив швидкості і температури заливки на шорсткість і величину пригару виливки, оскільки ці показники (поряд з відсутністю внутрішніх дефектів) є основними з точки зору якості лиття (таблиці 4.4 і 4.5).

Таблиця 4.4 - Вплив температури заливки на шорсткість і пригар виливки за швидкості заливки 0,5 кг/сек

Температура заливки, °C	Шорсткість, мкм	Пригар, г/см ²
1520	80	0,17
1540	74	0,18
1560	73	0,20
1580	81	0,24
1600	92	0,26

Більш висока температура заливки призводить до проникнення розплаву в

пори між частинками піску і підвищення шорсткості. Також з підвищенням температури спостерігається збільшення пригару.

Таблиця 4.5 - Вплив часу заливки на шорсткість і пригар виливки за температури 1550°C

Час заливки, сек	Шорсткість, мкм	Пригар, г/см ²
20	96	0,19
30	72	0,18
40	85	0,18
50	92	0,16

Очевидно, що найбільш оптимальною є швидкість заливки приблизно 0,5 кг/с. Швидка швидкість заливки призводить до виникнення надлишкового залишку продуктів згоряння полістиролу в зоні застигання виливки, що призводить до погіршення чистоти поверхні виливки. Повільна швидкість заливки призводить до охолодження виливки й утворення окалини, що також впливає на шорсткість. На величину пригару швидкість заливки принципово не впливає.

4.2. Моделювання процесу заливання та затвердіння відливки

З метою прогнозування процесу затвердіння виливків і визначення ділянок виливки, в яких найімовірніше утворення газової пористості доцільно скористатися програмою NovzFlow. Програма враховує конструктивні особливості виливків і технологічні режими її виготовлення.

Для початку моделювання процесів лиття потрібно створити тривимірну модель куца виливків і опоки. На рисунку 4.1 представлена модель виливки "Колесо ходове".

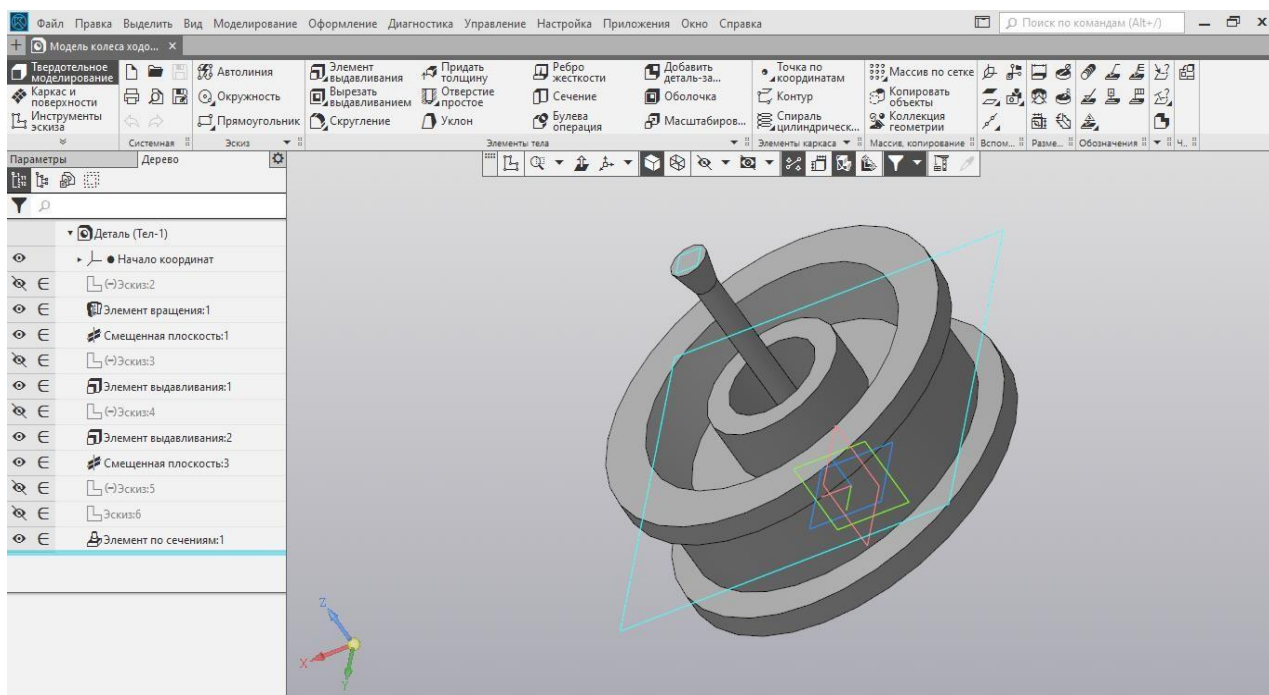


Рисунок 4.1 - Модель вилка "Колесо ходове"

Далі створюємо сітку поверхневих елементів на опці та кущі виливків, поверхневу сітку створюємо з розмірами мінімального елемента 1 мм, максимального 5 мм на опці, а також 1 мм та 2,5 мм на виливку і внутрішній поверхні опки, що являє собою в разі комп'ютерного моделювання контур куща опки.

У результаті побудови поверхневої сітки бачимо звіт про створення сітки з докладним описом кількості елементів. На рисунку 4.2 представлено звіт про створення поверхневої сітки.

Далі створюємо об'ємну сітку з аналогічними поверхневій сітці розмірами максимального і мінімального елемента.

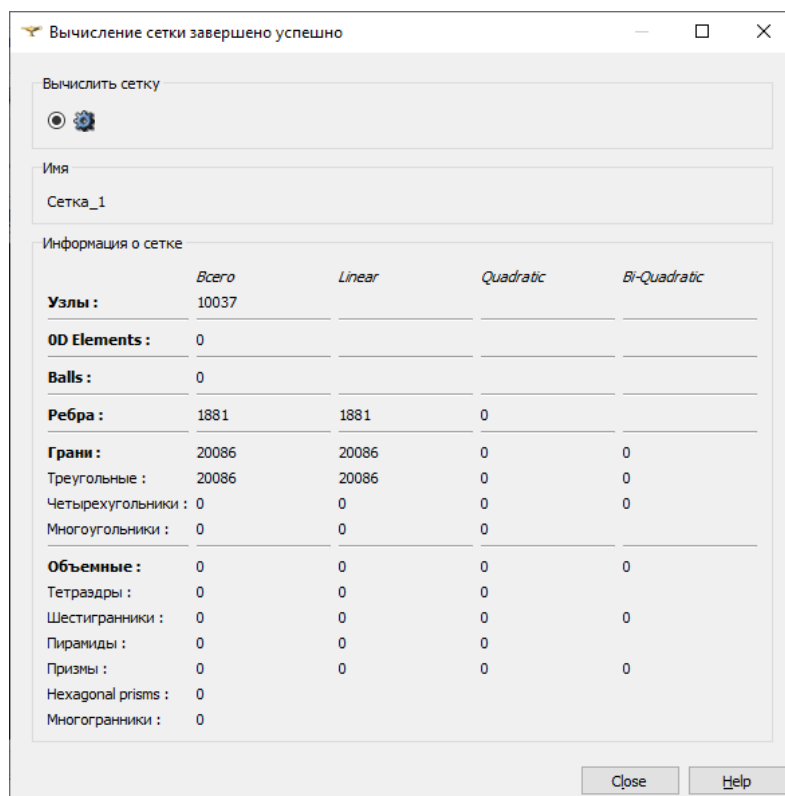


Рисунок4.2 - Звіт про створення поверхневої сітки

Далі переходимо в модуль програми "Мастер" і на вкладці "Розрахунок" задаємо параметри лиття (спосіб лиття, матеріал деталі, температуру, до якої ведеться розрахунок затвердіння, та інші параметри), Рисунок 4.3.

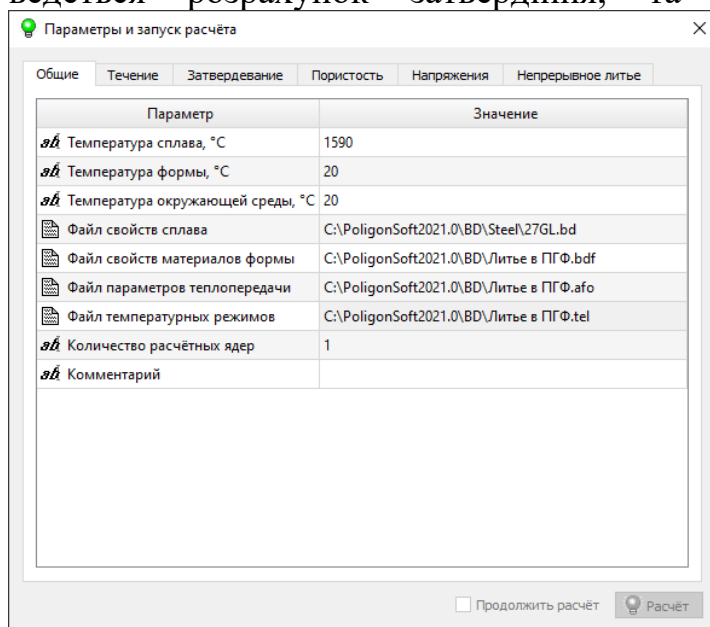
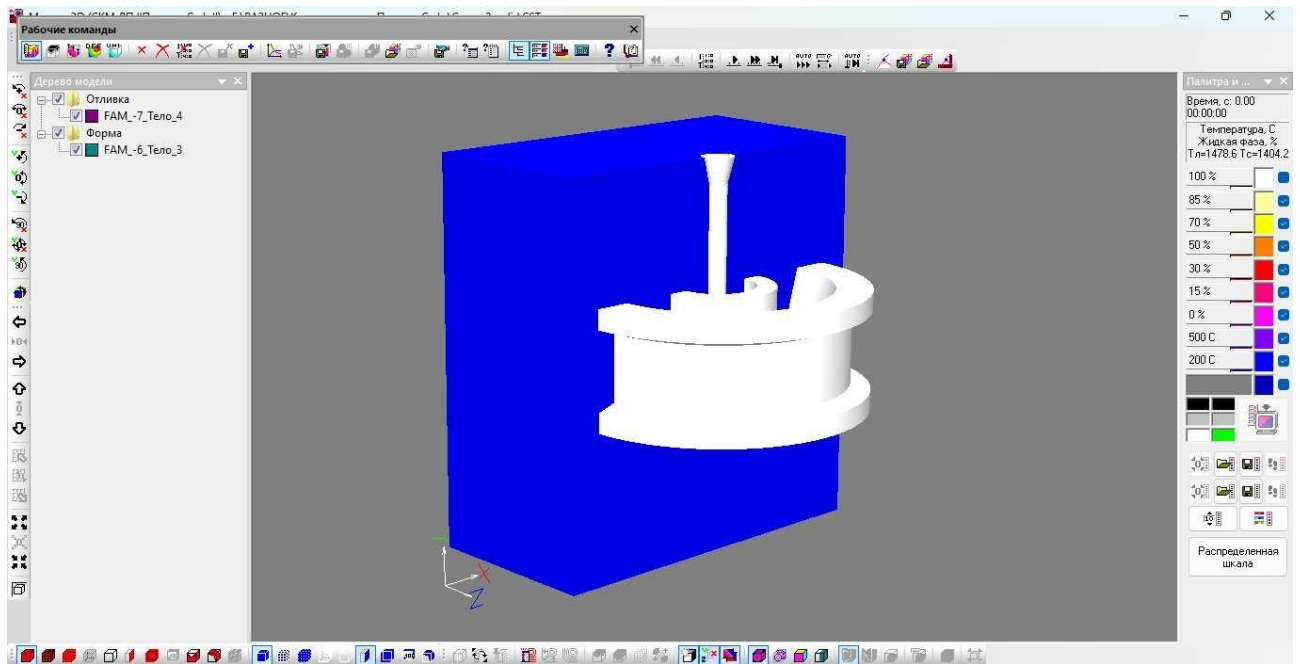


Рисунок 4.3 - Вікно програми з параметрами процесу заповнення форми

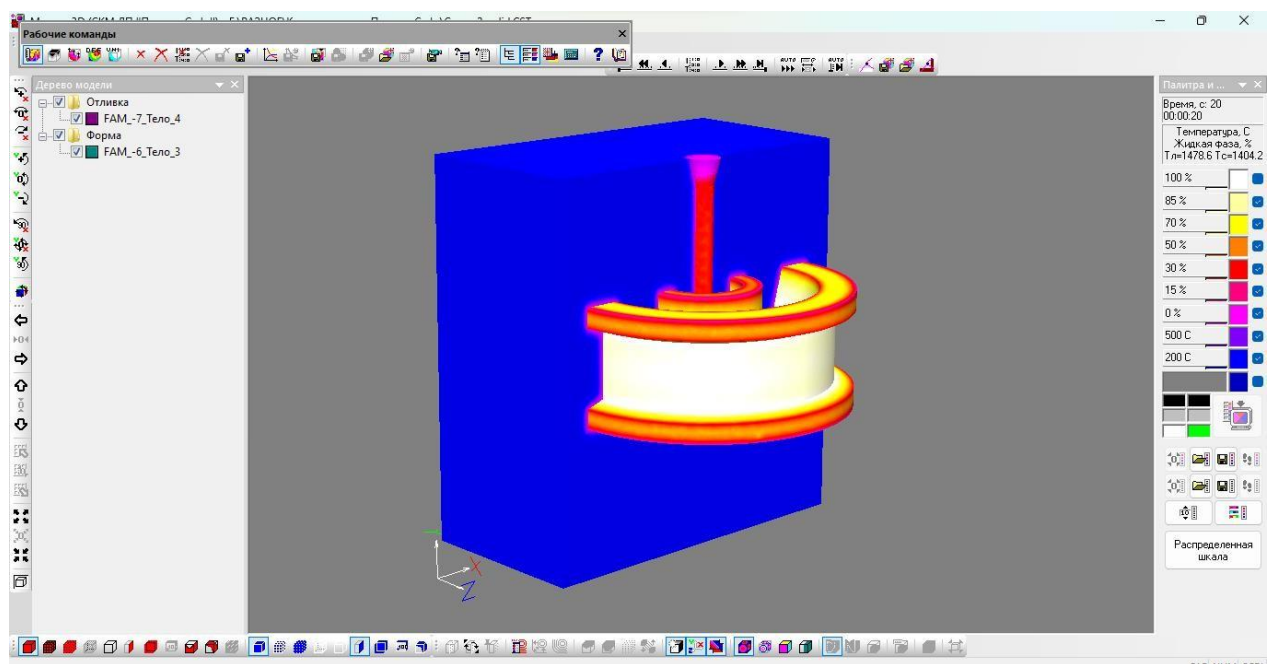
Результатом моделювання є кілька файлів із записом

моделювання процесу лиття. На рисунку 4.4 представлено моделювання

процесу затвердіння вилівки "Колесо ходове" за часу затвердіння протягом 140 секунд.



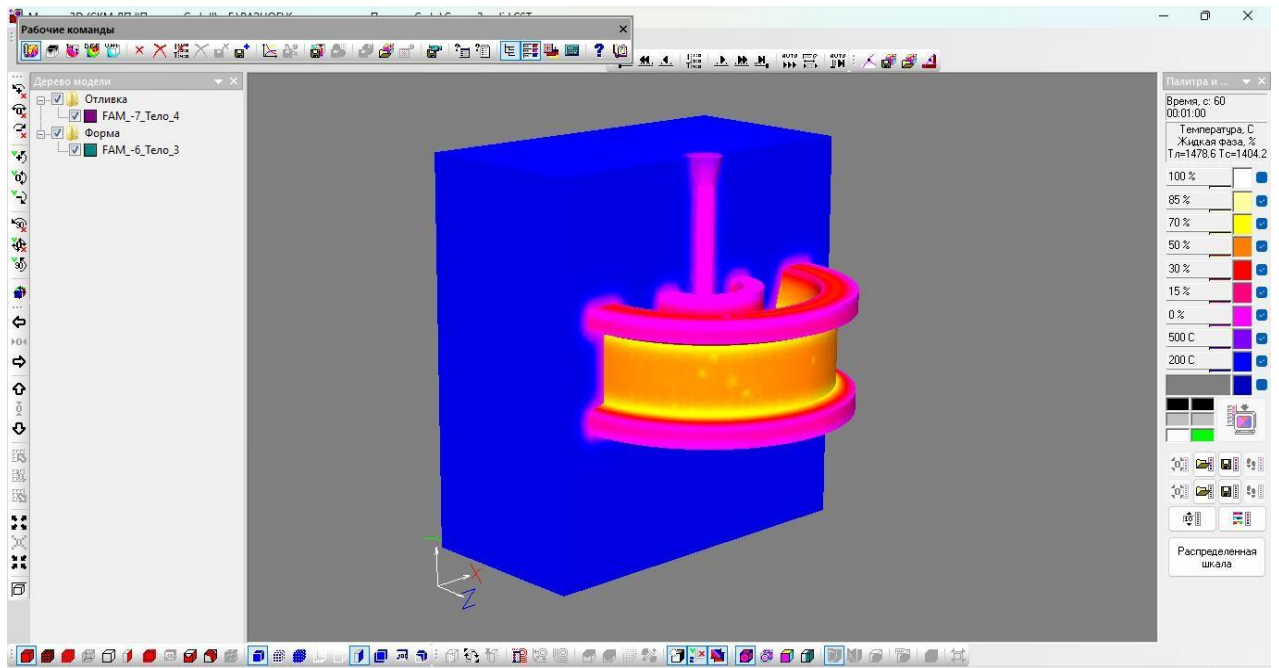
а



б

а - 0 секунд; б - 20 секунд

Рисунок.4.4 - Моделювання процесу затвердіння вилівки за часу після заливки,



В

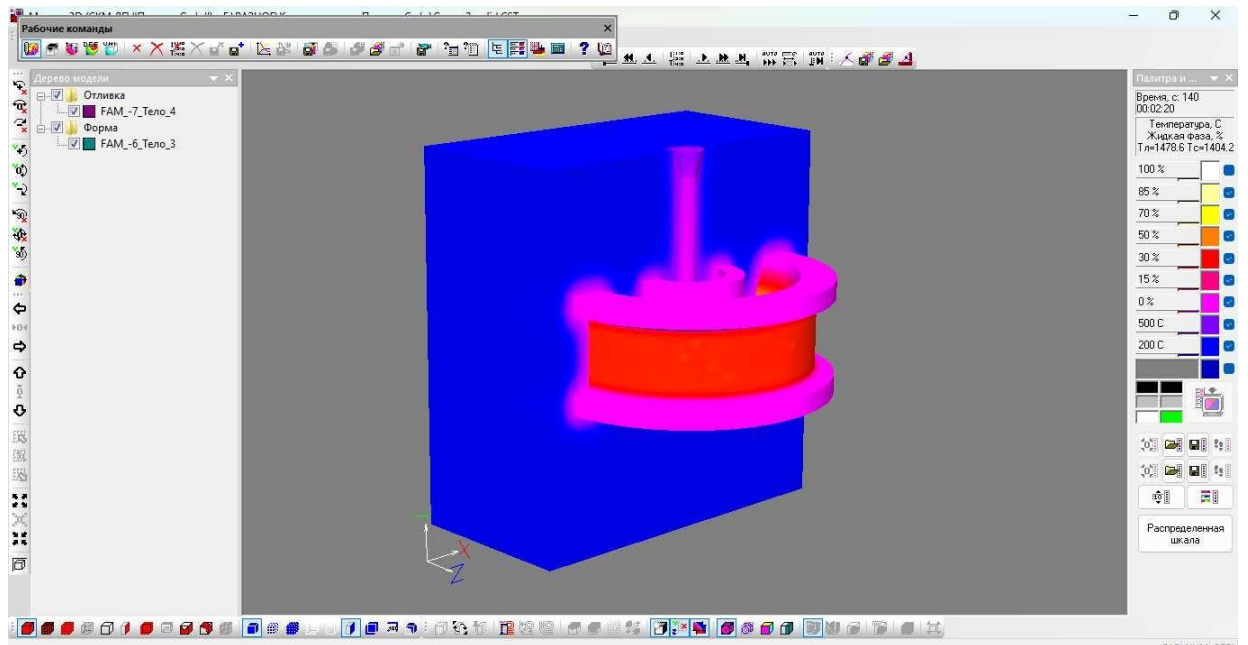


Рисунок.4.4 - Моделирование процесса затвердіння виливки за часу після заливки,

Із процесу моделювання затвердіння видно, що центральна частина виливки "Колесо ходове" твердне в останню чергу, і тому доцільно передбачити бічний (відвідний) надлив для сталевих виливків. Крім того, видно, що початок затвердіння відбувається через 20 секунд, отже, до цього часу має відбутися повна газифікація моделі та усунення слідів її деструкції в зоні розплаву.

Також було змодельовано ймовірність розподілу пористості у виливку "Колесо ходове" (рисунок 4.5) за умов використання моделі комплексного складу (задавали щільність моделі).

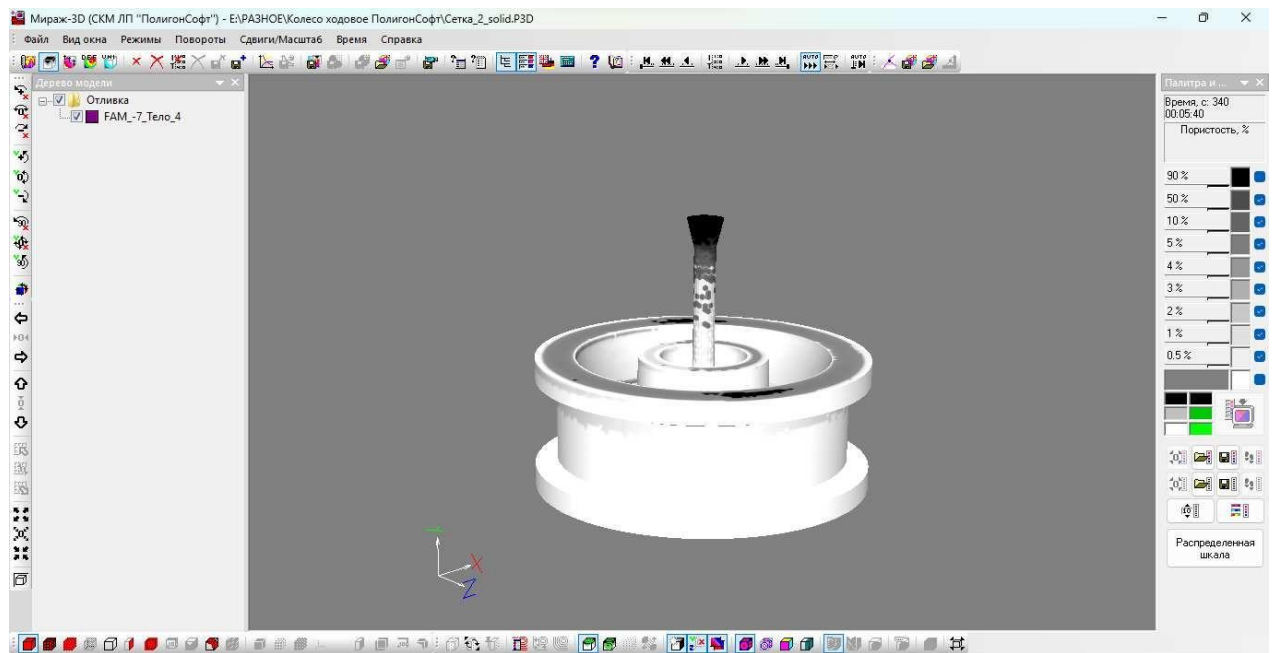


Рисунок 4.5 - Розподіл пористості у виливку "Колесо ходове"

З моделі видно, що наявність пор від 5 до 50% спостерігатимуться в стояку і приблизно 3% на верхній поверхні виливки, що можна виключити, додавши припуск на механічне оброблення в даній частині виливки, але оскільки перевагою технології якраз і є можливість виключення з технологічного процесу механічного оброблення виливків, пропонується по верхньому краю виливки додати в ливарний блок 4 випора, вони дають змогу сконцентрувати пористість у верхній частині випорів, а не в поверхневому шарі виливки (рисунок 4.6).

Таким чином, за допомогою моделювання визначено проблемні місця у виливку "Колесо ходове", які надалі враховано під час розрахунку ливниково-живильної системи.

Моделювання процесу лиття дає змогу провести відпрацювання обраної технології лиття з використанням ресурсів комп'ютерної системи, а не з використанням реальних виробничих потужностей підприємства, що істотно заощаджує витрати на виробництво.

Таким чином, з урахуванням моделювання температурного розподілу полів визначається найоптимальніша технологія отримання виливки "Колесо ходове", що дає можливість значно підвищити її геометричну точність і сприяє зниженню браку.

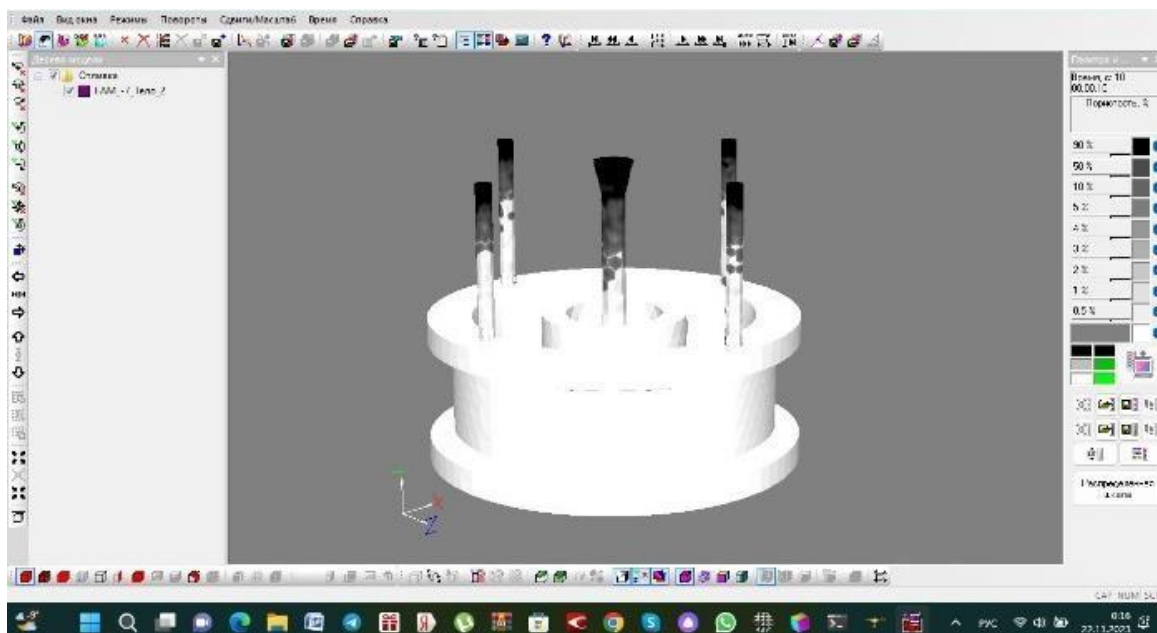


Рисунок 4.6 - Розподіл пористості у виливку "Колесо ходове" після встановлення випорів

4.3.Дослідження глибини науглецювання виливків

За запропонованою технологією в ливарному цеху проводилися дослідження якості виливків, виготовлених ЛГМ із застосуванням комплексного складу газифікованої моделі.

Із зазначених у роботі складів виготовляли моделі виливки "Колесо ходове" (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 - Модель виливки "Колесо ходове"

Після виготовлення виливків із них дисковою фрезою вирізали зразки, які використовували для приготування шліфів для мікроструктур.

У першій серії експериментів проводили оцінку впливу щільності моделі на глибину науглецювання (таблиця 4.6).

Очевидно, що зниження щільності моделі благотворно впливає на мінімізацію вуглецювання поверхні виливки. Однак, використання поєднання у використуваній пропорції будівельного і ливарного полістиролу призводить до найоптимальнішого укладання гранул, а отже, швидкість вигорання і видалення газів із порожнини форми відбувається послідовно, що практично можна порівняти зі швидкістю вигорання ливарного полістиролу.

Таблиця 4.6 - Вплив щільності моделі на глибину науглецювання

Щільність, г/см ³	Максимальна глибина вуглецювання, мкм
0,31	62,2
0,37	68,5
0,44	82,3

Також встановлювали випори діаметром 6 мм радіально з однаковими проміжками на поверхню моделі та розглядали доцільність їхнього застосування з погляду науглецювання (таблиця 4.7).

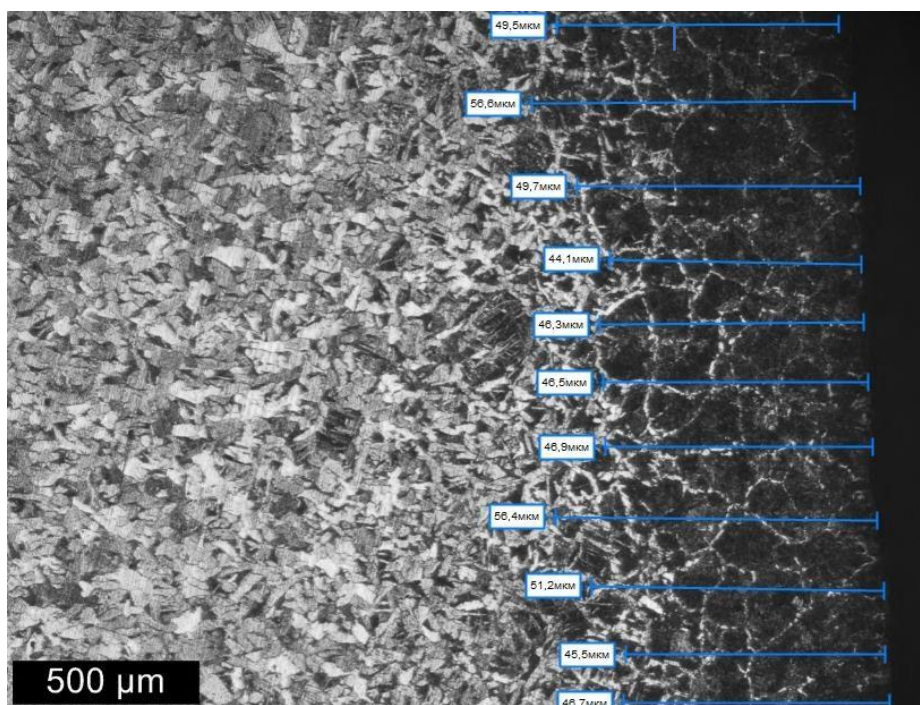
Таблиця 4.7 - Вплив числа випорів у ливарній формі на глибину вуглецювання

Число випорів	Максимальна глибина вуглецювання, мкм
0	79,9
2	66,1
4	64,5

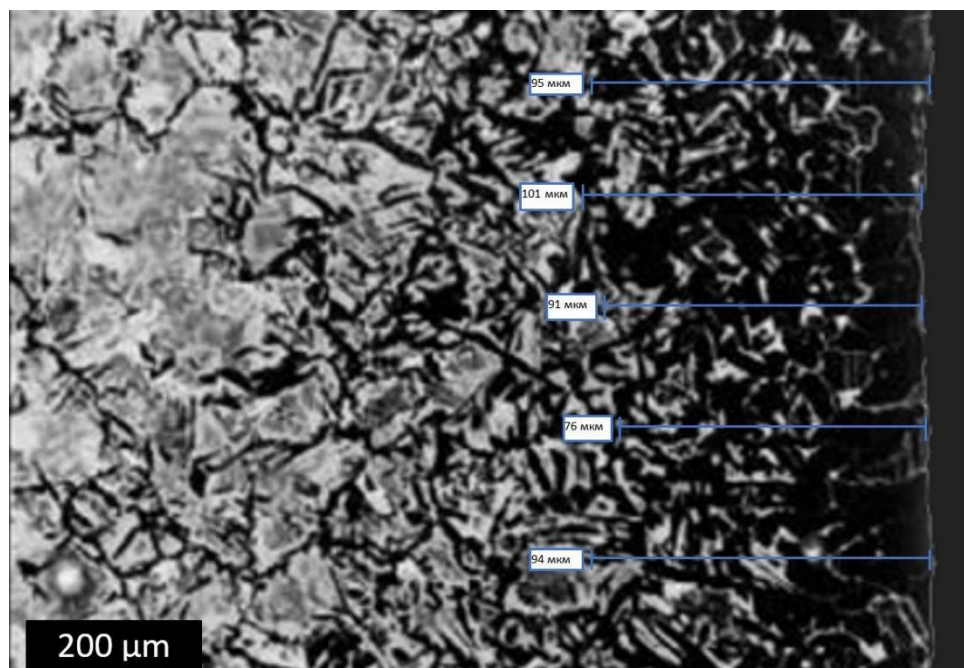
Як показали дослідження, наявність випорів загалом знижує глибину вуглецювання, однак, збільшення кількості випорів не позначається на вуглецюванні.

Мікроструктуру поверхневого шару зразка наведено на рисунку 4.8. Як видно з мікроструктури, максимальна глибина науглецювання при використанні комплексного складу полістролу досягає 56,4 мкм. Відомо з низки досліджень, що глибина науглерожування сталей із вмістом вуглецю 0,3-0,4% становить у середньому 76-105 мкм, що істотно більше, ніж глибина науглерожування за пропонованою технологією, внаслідок зниження густини моделі за рахунок використання будівельного полістиролу, що загалом знижує кількість вуглецю, який утворюється в результаті деструкції моделі.

Таким чином, пропонований комплексний склад полістиролової моделі із застосуванням пропонованих технологічних режимів для конкретних видів виливків розв'язує проблему вуглецювання поверхневого шару виливки.



а



б

а - отриманої за моделями з комплексним полістиролом; б - за моделями зливарного полістиролу

Рисунок 4.8 - Мікроструктура виливки марки Ст. 35Л і визначення глибини науглецювання поверхневого шару

Висновок до розділу

1. Визначено розміри для перетину живильників, шлаковловлювачів і стояка під час виплавки різних оливок при ЛГМ.
2. Моделюванням визначено вузькі місця виливки "Колесо ходове", які в подальшому враховано під час розрахунку ливниково-живильної системи. Зокрема, з урахуванням підвищеної ймовірності великої пористості на верхній поверхні виливки, запропоновано використання випорів по її окружності.
3. Для виливки "Колесо ходове" експериментально визначено оптимальні технологічні режими: швидкість заливки 0,5 кг/сек, температура заливки 1540-1560°C.
4. Для виливки "Колесо ходове" експериментально визначено оптимальні технологічні режими: швидкість заливки 0,5 кг/сек, температура заливки 1540-1560°C. За результатами проведених досліджень визначено, що для виливків зі сталі 35Л застосування комплексного полістиролу забезпечує зниження глибини науглецювання виливки, поліпшення поверхні властивостей. До того ж за відносно невеликого збільшення температури заливки (до 1560°C) підвищується рідкотекучість розплаву.
5. Пропонована технологія виготовлення деталі "Колесо ходове" дала змогу збільшити металоємність до 95% завдяки зниженню ваги виливки,

зберегти 20-25% використовуваної енергії, скоротити час процесу, а також значно знизити брак продукції до 0,8%.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Аналіз і дослідження технологічного процесу ЛГМ, дали змогу зробити обґрунтоване порівняння технологічних, експлуатаційних, економічних та екологічних показників процесів ЛГМ із використанням моделі з ливарного полістиролу і моделей комплексного складу (таблиці 5.1, 5.2, 5.3, 5.4).

Таблиця 5.1 - Техніко-економічні показники

Показники	ЛГМ з використанням ливарного полістиролу для моделі	ЛГМ з використанням полістиролу комплексного складу для моделі
технологічні		
Склад суміші	Однокомпонентний	Багатокомпонентний
Навуглецювання	Понад 100 мкм	Менше 80 мкм
Газопроникність	Висока	Висока
Шорсткість	Низька	Низька
Пригар	Середній	Низький
експлуатаційні		
Енергоємність технології	Низька	Низька
Поточна експлуатація	Середня	Середня
Займана площа обладнання	Мала	Мала

Таблиця 5.2 - Відомість капітальних вкладень у формувальну суміш і моделі з використанням ливарного полістиролу

Назва матеріалу	Вартість 1 кг, або л., грн	Кількість матеріалу, кг, або л.	Сума, грн
Пісок марки K0315A ГОСТ 2138-84, кг	1	50	50
Пінополістирол ливарний ПСВ-1Л, кг	240	25	6000
Фарба	80	10	800
Разом			6850

Таблиця 5.3 - Відомість капітальних вкладень у формувальну суміш і моделі комплексного складу

Назва матеріалу	Вартість 1 кг., м³ або л., грн	Кількість матеріалу, кг, або л.	Сума, грн
Пісок марки K02A ГОСТ 2138-84	0,8	15	12
Пісок марки K0315A ГОСТ 2138-84	1	35	35
Пінополістирол ливарний ПСВ-1Л	240	15	3600
Полістирол будівельний ППС-20	96	10	960
Фарба нова	51	9	460
Разом			5067

Шихтові матеріали нічим не відрізняються.

Таким чином, собівартістю 1 кг модельного складу, отриманого за старою технологією, становить 68,5 грн, а за пропонованою 53 грн, тобто модель із пропонованого складу на 20% дешевший

Порівняльний аналіз дефектів виливків і форм під час ЛГМ з використанням ливарного полістиролу і ЛГМ з використанням моделей комплексного складу наведено в таблиці 5.4.

Сумарно відсоток браку під час ЛГМ з використанням ливарного полістиролу для моделі становить ~1,8%, а під час ЛГМ з використанням полістиролу комплексного складу для моделі значно нижчий і становить ~1,0%.

Таблиця 5.4 - Порівняння видів браку виливків

Вид браку	ЛГМ з використанням ливарного полістиролу для моделі, %	ЛГМ з використанням полістиролу комплексного складу для моделі, %
Навуглецювання	0,5	0,2
Недолив	0,2	0,1
Засмічення	0,1	0,1
Пористість	0,8	0,5
Газові раковини	0,2	0,1

1. .

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Запропоновано новий склад матеріалу моделі для ЛГМ: будівельний полістирол ППС-20 - 40%. Розмір гранул - 0,5-0,8 мм. ливарний полістирол ПСВ-1Л - 60%. Розмір гранул - 0,2-1,2 мм. Запропонований склад дешевший на 20% від традиційного використовуваного ливарного полістиролу і має задовільну газопроникність та нижчу щільність, що сприяє зменшенню глибини науглецюваного поверхневого шару сталевих виливків.

Визначено вплив складу пінополістиролової моделі на величину пригару і шорсткість виливків. Показано, що наявність у складі моделі будівельного полістиролу сприяє повній газифікації моделі, що унеможливорює хімічний пригар на поверхні виливки і знижує її шорсткість.

Визначено вплив складу моделі на величину науглецювання виливки. Показано, що зниження щільності моделі благотворно впливає на мінімізацію науглецювання поверхні виливки. .

Зпропоновано склад швидковисихаючої фарби для комплексного складу полістиролової моделі. Наповнювач: пісок марки 1K02A - 35%, циркон - 15%, гідролізний спирт - 46,8%, полівінілбутираль - 3,2%. Визначено вплив товщини антипригарної фарби на шорсткість і величину пригару виливки. Показано, що зі збільшенням товщини шару фарби понад 1,2 мм шорсткість поверхні практично не змінюється і становить 30-35 мкм, що є задовільним для поверхні виливки. У межах 1,2-1,4 мм товщини шару фарби величина пригару є мінімальною і становить 0,14 г/см². Оптимальна товщина нанесення фарби з точки зору її витрат, шорсткості та пригару виливків - 1,5 мм при часі сушіння 3-3,5 год; при температура 55°C.

При формуванні як наповнювач використовувати піски 1K02 і 1K016 у співвідношенні 70 на 30. Таке поєднання демонструє найоптимальнішу щільність і мінімальний час ущільнюваності за збереження технологічно необхідної газопроникності.

Для запобігання погіршенню умов відкачування повітря і рівномірного вакуумування розроблено нову конструкцію вакуумованої опоки з розташуванням газових каналів не тільки на дні опоки, а й на її бічних стінках.

Моделюванням визначено вузькі місця виливки "Колесо ходове", які в подальшому враховано під час розрахунку ливниково-живильної системи. Зокрема, з урахуванням найбільшої ймовірності утворення пористості на верхній частині виливки, запропоновано використання випори по її колу.

Для виливки "Колесо ходове" експериментально визначено оптимальні технологічні режими: швидкість заливки 0,5 кг/сек, температура заливки 1540-1560°C. За результатами проведених досліджень визначено, що для виливків зі сталі 35Л застосування комплексного полістиролу забезпечує зниження глибини науглецювання виливки, поліпшення поверхні властивостей. До того ж за відносно

невеликого збільшення температури заливки (до 1560°C) підвищується рідиннотекучість розплаву, що позитивно позначається на заповнюваності форми.

Порівняння собівартості моделей з ливарним полістиролом і з комплексним складом моделі показало, що в першому випадку вони на 20% більші, ніж у другому. Отже, використання запропонованого комплексного складу моделі економічно обґрунтоване.