

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА

«___» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності _____ 132 Матеріалознавство _____

освітньо-професійної програми _____ «Прикладне матеріалознавство» _____

на тему: «Розробка екологічно чистих ливарних форм на основі полімерних композицій» _____

Здобувача групи _____ МТ.м-21 _____ В'юна Ярослава Юрійовича

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

_____ Ярослав В'ЮН

Керівник _____
доцент кафедри ПМ і ТКМ,
к.т.н., доц. Христина БЕРЛАДІР _____

Нормоконтроль _____
доцент кафедри ПМ і ТКМ
к.т.н., доц. Андрій ДЕГУЛА _____

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА
«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
В'юн Ярослав Юрійович

1. Тема проєкту (роботи) «Розробка екологічно чистих ливарних форм на основі полімерних композицій», затверджена наказом по університету від «09» листопада 2023 р. № 1254-VI.
2. Термін здачі студентом закінченого проєкту(роботи)
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Полімерні композиції, що складаються з олігомеру, затверджувача або каталізатора та наповнювача, їх склади, показники властивостей.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)
 - 1) Аналіз літературних джерел за темою роботи.
 - 2) Викладення загальної методики й основних методів досліджень.
 - 3) Експериментальні дослідження та узагальнення результатів.
 - 4) Економічна частина.
 - 5) Охорона праці, довкілля та техніка безпеки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Обов'язковими є дані з властивостями матеріалів.

6. Консультанти з проєкту (роботи), із значенням розділів проєкту, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Говорун Т. П.	10.11.2023 р.	
Економічна частина	Берладір Х. В.	16.11.2023 р.	

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та вибір основних напрямів дослідження	жовтень 2023 р.	Виконано
2	Загальна методика та основні методи дослідження	листопад 2023 р.	Виконано
3	Експериментальні дослідження та загальні результати	листопад 2023 р.	Виконано
4	Економічна частина	грудень 2023 р.	Виконано
5	Охорона праці, довкілля, та техніка безпеки	грудень 2023 р.	Виконано

7. Дата видачі завдання

Студент _____
(підпис)

Керівник проєкту _____
(підпис)

АНОТАЦІЯ

В'юн Ярослав Юрійович. Розробка екологічно чистих ливарних форм на основі полімерних композицій – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття кваліфікації магістра зі спеціальності 132 Матеріалознавство. – Сумський державний університет, 2023.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню та оптимізації основних властивостей екологічно чистої полімерної композиції на основі олігофурфурилоксисилоксанів (ОФОС), яка може бути використана для виготовлення ливарних форм і стрижнів при виробництві виливків із чорних і кольорових металів.

Встановлено, що зростання міцності полімерної композиції з часом підкоряється експоненціальному закону. Для всіх експоненціальних кривих були виведені математичні рівняння. Показники міцності на стиск полімерної композиції з ОФОС з усіма використаними кислотними каталізаторами були визначені: через 1 год – 1.3–1.54 МПа; через 3 год – 2.5–2.9 МПа; через 24 год – 4.9–6.1 МПа, що відповідає вимогам до ливарних форм перед заливкою металом.

Застосування полімерних композицій з ОФОС забезпечує екологічну безпеку технологічного процесу, завдяки відсутності виділення токсичних речовин, як на «холодній» стадії процесу, так і під час розливання розплавленого металу, охолодження, вибивання та утилізації полімерної композиції. Це дає можливість економити енергоресурси, а отже, зменшувати загальну вартість всього технологічного процесу та виливків.

Ключові слова: полімерна композиція холодного твердіння, каталізатор, міцність, живучість, обчислювальне моделювання, математичні залежності, енергоефективність.

ABSTRACT

V'yun Yaroslav Yuriyovych. Development of environmentally clean casting molds based on polymer compositions. – Manuscript.

Qualification work for master's qualification in specialty 132 Materials Science.
– Sumy State University, 2023.

The qualification work is devoted to the research and optimization of the main properties of an environmentally friendly polymer composition based on oligofurfuryloxysiloxanes (OFOS), which can be used for the manufacture of casting molds and rods in the production of castings from ferrous and non-ferrous metals.

It was established that the increase in strength of the polymer composition obeys the exponential law over time. Mathematical equations were derived for all exponential curves. The compressive strength indicators of the polymer composition with OFOS with all used acid catalysts were determined: after 1 h – 1.3–1.54 MPa; after 3 hours – 2.5–2.9 MPa; after 24 hours – 4.9–6.1 MPa, which meets the requirements for casting molds before filling with metal.

The use of polymer compositions with OFOS ensures the environmental safety of the technological process due to the absence of the release of toxic substances, both at the «cold» stage of the process and during the pouring of molten metal, cooling, knocking, out and disposal of the polymer composition. This makes it possible to save energy resources and, therefore, to reduce the total cost of the entire technological process and castings.

Keywords: polymer composition of cold hardening, catalyst, strength, survivability, computational modeling, mathematical dependencies, energy efficiency.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра вміщує **50 сторінок**, зокрема **6 рисунків, 3 таблиць, список із 44 використаних джерел на 5 сторінках.**

Мета роботи – моделювання, дослідження та вивчення основних властивостей екологічно чистої полімерної композиції на основі ОФОС, яка може бути використана для виготовлення ливарних форм та стрижнів при виробництві виливків із чорних та кольорових металів.

Об'єкт дослідження – математичні моделі технологічного процесу отримання екологічно чистих ливарних форм на основі полімерних композицій..

Предмет дослідження – полімерні композиції, що складаються з олігомеру, затверджувача або каталізатора та наповнювача.

Методи дослідження – стандартні методи визначення експлуатаційних властивостей полімерних композицій, методи математичного моделювання, методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше отримано номограму, яка описує залежності між параметрами технології та властивостями полімерної композиції. На основі даних номограми можливе коригування параметрів процесу виготовлення полімерної композиції за рахунок зміни кількості складових, що може бути використане для оперативного управління властивостями полімерної композиції.

Ключові слова: полімерна композиція холодного твердіння, каталізатор, міцність, живучість, обчислювальне моделювання, математичні залежності, енергоефективність.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	11
Висновок до розділу 1	16
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	17
2.1 Матеріали	17
2.2 Технологія отримання зразків	18
2.3 Методи дослідження	19
Висновок до розділу 2	20
РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	21
3.1 Моделювання міцності на стиск полімерних композицій	21
3.2 Моделювання оптимальних параметрів і властивостей полімерної композиції	26
3.3 Побудова номограми, яка описує залежності між параметрами технології та властивостями полімерної композиції	28
Висновок до розділу 3	31
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	32
Висновок до розділу 4	34
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	35
5.1 Небезпечні й шкідливі виробничі чинники при застосуванні полімерних композицій	35
5.2 Основні небезпечні й шкідливі виробничі чинники в ливарних цехах	37
5.3 Екологізація виробництва в процесі виготовленні ливарних форм на основі полімерних композицій	39
5.4 Основні засоби зменшення шкідливих викидів у навколишнє середовище підприємствами ливарного виробництва	40
Висновок до розділу 5	41
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

ВСТУП

Для будь-якого виду продукції машинобудування литі вироби з металу складають значну частину за трудомісткістю та масою виготовлення. Конкурентоспроможність кінцевої продукції – двигунів, верстатів, автомобілів визначаються якістю виливків, їх точністю та економічністю їх виробництва. Нині удосконалення продукції машинобудування відбувається за рахунок підвищення складності, точності, якості, експлуатаційних властивостей, зменшення товщини стінок і маси литих деталей.

Підвищення складності, точності та зниження тонкостінності литих деталей поряд із вимогами мінімізації трудових витрат та ефективного захисту навколишнього середовища значно впливають на розвиток технологій виробництва виливків. Це повною мірою стосується і технології виготовлення ливарних форм.

Для того, щоб отримати вилівок без дефектів, ливарні форми мають відповідати комплексу певних властивостей. Основний обсяг одержуваних виливків (75...80%) виготовляють в одноразових формах, властивості яких визначають якість виливків. Однак 40...60% дефектів виливків зумовлено незадовільною якістю формувальних матеріалів і сумішей, з яких виготовляється ливарна форма.

На сьогоднішній день у ливарному виробництві більшу кількість ливарних форм виготовляють з використанням сумішей холодного тверднення на основі полімерних композицій. Суміші холодного тверднення стали основними у виготовленні форм в поодинокому і серійних виробництвах у промислово розвинених країнах. Обсяг використання полімерів у ливарному виробництві досить великий. Це пояснюється високою міцністю суміші за невеликої її витрати, можливістю регулювання швидкості затвердіння суміші у великому діапазоні, відсутністю операції сушіння та необхідності в сушильному обладнанні, легким вибиванням сумішей із внутрішніх порожнин виливок і вибиванням виливок із форм, низькою енергоємністю процесу, завдяки чому суттєво спрощується та скорочується цикл виготовлення виливки.

Однак залишається одна важлива проблема – це негативний вплив продуктів термодеструкції полімерних композицій на безпеку життєдіяльності людини і на навколишнє середовище. Під час їх використання утворюються від 30 до 40% (за масою) токсичних продуктів у вигляді газів і конденсату. Значна частина продуктів деструкції залишається у відпрацьованих сумішах. Відмовитися сьогодні від СХТ на основі полімерних композицій у ливарному виробництві практично неможливо. Тому розробка і застосування екологічно чистих складів сумішей холодного тверднення для ливарних форм на основі полімерних композицій зі збереженням показників їх основних фізико-механічних і технологічних властивостей, розробка технології їх приготування є актуальною задачею виробництва литих деталей.

Метою роботи є моделювання, дослідження та вивчення основних властивостей екологічно чистої полімерної композиції на основі ОФОС, яка може бути використана для виготовлення ливарних форм та стрижнів при виробництві виливків із чорних та кольорових металів.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні **завдання**:

- 1) проведення літературного огляду щодо аналізу сучасних технологій розробки екологічно чистих полімерних композицій.
- 2) моделювання міцності на стиск розроблених полімерних композицій.
- 3) моделювання оптимальних параметрів і властивостей полімерної композиції.
- 4) побудова номограми, яка описує залежності між параметрами технології та властивостями полімерної композиції.

Об'єкт дослідження – математичні моделі технологічного процесу отримання екологічно чистих ливарних форм на основі полімерних композицій..

Предмет дослідження – полімерні композиції, що складаються з олігомеру, затверджувача або каталізатора та наповнювача.

Методи дослідження. Методики дослідження фізико-механічних та технологічних властивостей полімерної композиції базувалися на стандартних

методах дослідження. Графічні залежності отримано шляхом експоненціальної апроксимації даних методом найменших квадратів.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше отримано номограму, яка описує залежності між параметрами технології та властивостями полімерної композиції. На основі даних номограми можливе коригування параметрів процесу виготовлення полімерної композиції за рахунок зміни кількості складових, що може бути використане для оперативного управління властивостями полімерної композиції. Використання номограми дає змогу стабілізувати властивості полімерної композиції холодного тверднення в промислових умовах.

Практична цінність. Перспективність використання запропонованих полімерних композицій полягає в тому, що для їх використання не потрібно змінювати технологічний процес виготовлення форм для отримання виливків, які існують на підприємстві.

Особистий внесок. Автору належить аналіз літературних даних, визначення мети та постановки завдання дослідження, виготовлення зразків, проведення випробувань та розрахунків, оформлення роботи.

Дипломна робота магістра включає в себе 50 сторінок, зокрема 6 рисунків, 3 таблиць, список із 44 використаних джерел на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для будь-якого виробу машинобудування значну частку в трудомісткості і масі займають литі металеві вироби. Конкуренентоспроможність кінцевої продукції (двигунів, верстатів, автомобілів тощо) визначається якістю виливків, їх точністю та ефективністю виробництва.

Удосконалення виробів машинобудування відбувається шляхом підвищення складності, точності, якості, продуктивності, зменшення товщини стінок і маси литих деталей, застосування присадок для лиття тощо [1, 2]. За останні роки металомісткість виробів зменшено на 10–20 % [3], а припуски та допуски на лиття – більш ніж у 1,5–2,0 рази [4].

Зростання складності, точності та зменшення кількості тонкостінних і литих деталей, поряд з вимогами мінімізації трудовитрат і ефективного захисту навколишнього середовища істотно впливають на розвиток технологій виробництва виливків.

Сентіль та ін. [5] запропоновано вакуумне лиття, яке дозволяє виробникам відмовитися від піскозмішувачів та іншого обладнання, необхідного для затверділого піску. Цей процес, як правило, чистий і не містить випарів або запахів, а сухий пісок просто переробляється для наступного застосування.

Куо та ін. [6] досліджували тип технології для розробки прес-форми для лиття під тиском з високою продуктивністю охолодження, шляхом інтеграції моделювання формування та технології швидкої обробки. Було встановлено, що використання пінополіуретану для великої ливарної форми заощадило близько 50% вартості виробництва.

Гакс та ін. [7] досліджували адгезійні властивості різних полімерних поверхонь, оброблених різними параметрами плазмових процесів. Вони використовували 2^{n-1} факторний план дослідження експериментів і не

спостерігали кореляції між будь-якою частиною вільної енергії поверхні та властивостями адгезії підготовлених поверхонь.

Раджагуру та ін. [8] розробили непрямий швидкий інструмент із використанням безгальванічного нікелювання для малосерійного виробництва пластикових лиття під тиском для моделей швидкого прототипування. Вставку з порожниною можна виготовити із загальнодоступних недорогих матеріалів протягом 48 годин, а термін служби інструменту подовжується за нормальних умов обробки пластику.

Лю та ін. [9] запропонували нове водорозчинну керамічну серцевину на основі кальцію, використовуючи сполучну епоксидну смолу для лиття по моделлю за допомогою водного гелю. Повідомляється, що такий матеріал міг би подолати погану здатність до вилуговування звичайної керамічної серцевини та підвищити ефективність виробництва.

Куо та ін. [10] також експериментально досліджували вплив чотирьох різних охолоджуючих середовищ на ефективність охолодження десяти наборів прес-форм, виготовлених з різних сумішей. Було виявлено, що епоксидна смола з 41 об.% алюмінієвої пудри була оптимальною формулою для виготовлення лиття під тиском, оскільки досягається економія загальних витрат на виробництво приблизно на 24% порівняно з литтям під тиском, виготовленим із комерційно доступних матеріалів.

Суть одержання виливків полягає в тому, що розплавлений і перегрітий сплав заданого складу заливають у заздалегідь підготовлену форму, внутрішня порожнина якої з максимальним ступенем наближення відтворює конфігурацію та розміри майбутнього виробу [11].

Розплав, заповнюючи внутрішню порожнину форми, кристалізується в ній і утворює вилівок. Зовнішні контури вилівка утворені стінками порожнини форми, а внутрішні порожнини, отвори, порожнини, канали і складні зовнішні поверхні утворені вставками у форми, званими стрижнями.

Для отримання вилівка без дефектів форми повинні відповідати набору певних властивостей.

Гутовський і Блендзкі [12] представили оптимізовані композитні матеріали з підвищеною температурою термічного опору, які дозволяють гнучко контролювати властивості матеріалу та виготовлення.

Хамасаїд та ін. [13] досліджували два алюмінієві сплави і встановили, що видимий час затвердіння Al-9Si-3Cu більший, ніж у Al-7Si-0,3Mg, і він збільшується з товщиною покриття.

Основний обсяг отриманих виливків (75–80%) виготовляють в разових формах, властивості яких визначають якість виливків. Виникнення поверхневих ливарних дефектів [14] зумовлено незадовільною якістю формувальних матеріалів і сумішей, з яких виготовлена форма.

Чен і Кауфманн [15] запропонували підхід до застосування машинного навчання для прогнозування та розуміння пов'язаних з поверхнею лиття дефектів. Вони розробили шість різних алгоритмів машинного навчання, за допомогою яких дані про виробництво сталі та чавуну можна використовувати для створення моделей для прогнозування дефектів поверхні лиття.

Постійно вдосконалюються процеси виготовлення форм, які займають важливе місце у виробництві виливків.

Гримзінім та ін. [16] розроблено технологію приготування та сушіння форм і стрижнів на основі піщано-гіпсових сумішей. Він визначив показники міцності, довговічності, газопроникності, крихкості, що складають якість виливка.

Міцність форми повинна бути такою, щоб конфігурація і розміри форми не змінювалися в процесі заповнення розплавом, під час кристалізації [17] і деякий час при її подальшому охолодженні [18], поки залитий метал не набуде достатня міцність для збереження конфігурації виливка. Однак міцність не повинна бути високою під час усадки виливка, інакше стійкість форми до усадки спричинить напруги та тріщини у виливках. Ці дві протилежні вимоги можуть бути задоволені при виготовленні прес-форм на основі полімерних композицій.

Сьогодні в індустріально розвинутих країнах в одиничному і серійному виробництві виготовляється більша кількість ливарних форм із застосуванням холоднотверднучих сумішей (ХТС) на основі полімерних композицій.

Обсяг використання полімерів у ливарному виробництві дуже великий. Це пояснюється високою міцністю суміші при невеликій її витраті, можливістю регулювання швидкості затвердіння суміші у великому діапазоні, відсутністю операції сушіння та необхідності в сушильному устаткуванні, легкою вибиванням сумішей з внутрішніх порожнин виливків і виливків з форм, низькою енергоємністю процесу, завдяки чому суттєво спрощується та скорочується цикл виготовлення виливки.

Пономаренко та ін. [19] запропоновано новий спосіб виготовлення сердечників на основі ХТС, які тверднуть при кімнатній температурі. Це пояснюється високою міцністю суміші при малій витраті, можливістю регулювання швидкості затвердіння суміші в широкому діапазоні [20], відсутністю операції сушіння та необхідності сушильного обладнання [21], легким вибиванням із сумішей із внутрішніх порожнин виливків і виливків із форм [22], низька енергоємність процесу, що значно спрощує та скорочує цикл виготовлення виливків [23].

Проте однією суттєвою проблемою є негативний вплив продуктів термічної деструкції полімерних композицій на безпеку життя людини та навколишнього середовища [24]. При використанні утворюється від 30 до 40 % (за масою) токсичних продуктів у вигляді газів і конденсату [25]. Значна частина продуктів розпаду залишається в сумішах відходів.

Сьогодні відмовитися від ХТС на основі полімерних композицій в ливарному виробництві практично неможливо.

Тому розробка та застосування екологічно чистих композицій холоднотверднучих сумішей для ливарних форм на основі полімерних композицій із збереженням показників їх основних фізико-механічних і технологічних властивостей, розробка технології їх приготування є актуальною проблемою виробництва литих деталей.

Синтетичні полімери (смоли) кислотного затвердіння є продуктами поліконденсації формальдегідів з карбамідом (сечовиною) та/або фенолом та/або фурфуроловим спиртом і включають:

- карбамідоформальдегідні (карбамідні) смоли;
- карбамідоформальдегідно-фуранові (карбамідно-фуранові) смоли;
- карбамідно-фенолформальдегідні (карбамідно-фенольні) смоли;
- фенолкарбамідно-формальдегідні (фенолкарбамідні) смоли;
- фенолформальдегідні (фенольні) смоли;
- фенолформальдегідно-фуранові (фенолфуранові) смоли.

Полімерна композиція на основі ОФОС також твердне під дією кислот. Однак застосування полімерних композицій з ОФОС забезпечує екологічну безпеку процесу, завдяки відсутності виділення токсичних речовин, як на «холодній» стадії процесу, так і під час заливання розплавленим металом, охолодження, вибивання, та утилізація полімерних композицій.

Висновок до розділу 1

Для будь-якого виробу машинобудування значну частку в трудомісткості і масі займають литі металеві вироби. Конкурентоспроможність кінцевої продукції (двигунів, верстатів, автомобілів тощо) визначається якістю виливків, їх точністю та ефективністю виробництва.

Зростання складності, точності та зменшення кількості тонкостінних і литих деталей, поряд з вимогами мінімізації трудовитрат і ефективного захисту навколишнього середовища істотно впливають на розвиток технологій виробництва виливків.

Обсяг використання полімерів у ливарному виробництві дуже великий. Це пояснюється високою міцністю суміші при невеликій їх витраті, можливістю регулювання швидкості затвердіння суміші у великому діапазоні, відсутністю операції сушіння та необхідності в сушильному устаткуванні, легкою вибиванням сумішей з внутрішніх порожнин виливків і виливків з форм, низькою енергоємністю процесу, завдяки чому суттєво спрощується та скорочується цикл виготовлення виливки.

Проте однією суттєвою проблемою є негативний вплив продуктів термічної деструкції полімерних композицій на безпеку життя людини та навколишнього середовища. При використанні утворюється від 30 до 40 % (за масою) токсичних продуктів у вигляді газів і конденсату. Значна частина продуктів розпаду залишається в сумішах відходів.

Тому розробка та застосування екологічно чистих композицій для ливарних форм на основі полімерних композицій із збереженням показників їх основних фізико-механічних і технологічних властивостей, розробка технології їх приготування є актуальною проблемою виробництва литих деталей.

РОЗДІЛ 2.

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали

Для виготовлення ливарних форм використовують полімерні композиції, що складаються з олігомеру, затверджувача або каталізатора та наповнювача [26-30]. Затвердіння здійснюється за рахунок реакції поліконденсації, яка відбувається в суміші холодного тверднення при додаванні каталізатора [31-37].

Як олігомер під час виробництва ливарних форм використовуємо екологічно чисте сполучне на основі олігофурфурилоксисилоксанів (ОФОС) [38]. ОФОС являє собою рухому рідину темно-коричневого кольору, яка твердіє під дією кислотних затверджувачів. У своєму складі ОФОС не містить дифенілолпропану, отруйних та токсичних речовин – типу фенолів і альдегідів, що виділяються при термічній деструкції під час заливки розплавленим металом форми.

Крім того, в процесі його застигання утворюється полімерна композиція з просторовою сітчастою структурою, де поряд з поздовжніми зв'язками в їхніх макромолекулах присутні і поперечні зв'язки. Така структура забезпечує високу міцність ливарної форми [39].

ОФОС можна отримати різних модифікацій із вмістом від 4 до 6 молей фурфурилоксигруп.

У роботі досліджуються олігомери MF4, MF5, MF6 із вмістом 4, 5, 6 фурфурилоксигруп відповідно. При отриманні ОФОС використовується етилсилікат-40 (ЕТС-40), фурфуриловий спирт і каталізатор.

Процеси, які відбуваються в полімерній композиції, структурно описані на рис. 2.1.

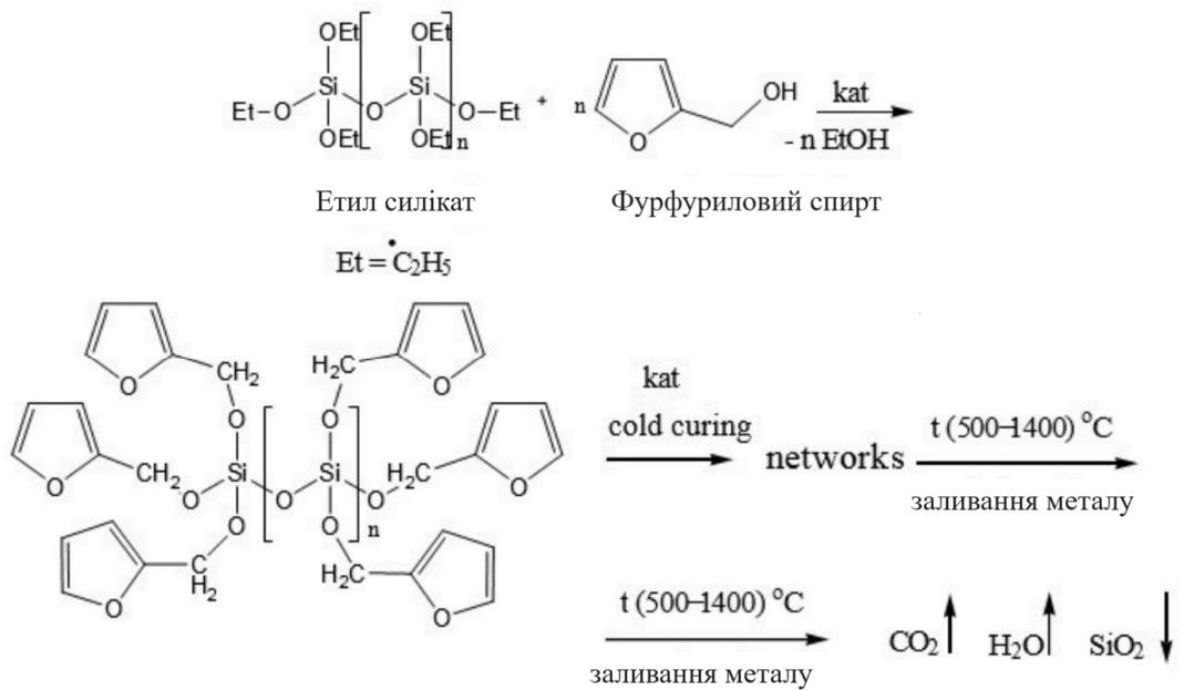


Рисунок 2.1. Структурна схема процесів, що відбуваються в полімерній композиції.

Полімерна композиція полімеризується за іон-радикальним механізмом в процесі розкриття подвійних зв'язків у фуранових циклах за звичайних температур у приміщенні. При цьому вона за рахунок теплоти полімеризації подвійних зв'язків розігрівається до температури 60...70°C і утворює сітчасту структуру в умовах холодного формування форм та стрижнів. Під час взаємодії компонентів з олігомером ОФОС не утворюється вільного фурфурилового спирту, як, наприклад, у разі використання фуранових смол.

Під час заливання розплавлених металів у форми відбувається процес термічної деструкції сітчастої структури полімерної композиційної зв'язувальної речовини. У результаті термічної деструкції в атмосферу виділяються CO_2 і пари H_2O та утворюється твердий неорганічний залишок SiO_2 , який можна використовувати повторно.

2.2 Технологія отримання зразків

Технологія виготовлення форм та стрижнів з використанням таких полімерних композицій забезпечує екологічну безпеку технологічного процесу

внаслідок відсутності виділення отруйних і токсичних речовин, як у «холодній» стадії процесу, так і під час заливки розплавленим металом, охолодження, вибивання та утилізації формувальних сумішей. При цьому повністю відсутня операція вибивання стрижнів з виливків і виливків з форм, з'являється можливість використання дешевого оснащення. Крім того, їхнє використання дає змогу заощаджувати енергоресурси і тим самим зумовлювати зниження загальної собівартості всього технологічного процесу та цільової продукції отримання виливків.

Полімерну композицію для виготовлення форм готували наступним чином: на 100 мас. ч. кварцового піску $2K_1O_3O_2$ за ГОСТ 29234.0-91 додавали 1...2 мас. ч. 50...70 % водного розчину кислоти. У роботі були використані бензолсульфо кислота (БСК), паратолуолсульфо кислота (ПТСК), сульфосаліцилова кислота (ССК). Складові ретельно перемішували протягом 60 секунд, потім до неї додавали 1,2...2 мас. ч. ОФОС і знову ретельно перемішували протягом 120 секунд. ОФОС використовували різних модифікацій із вмістом від 4 до 6 молей фурфурилоксигруп.

Зразки для випробувань виготовляли наступним чином: отриману полімерну композицію формували в 9-місну прес-форму, витримували протягом 30 хвилин і зразки діставали з форми.

Якість ливарної форми визначається якістю формувальних полімерних композицій, що використовуються під час їх виготовлення.

2.3 Методи дослідження

У роботі було досліджено основні властивості полімерних композицій, від яких залежить якість виливків під час лиття в піщані форми. До них належать: міцність, живучість, газоутворювальна здатність, газопроникність, вологість, осипання, вогнестійкість, вибивання і прилипання.

Методики дослідження фізико-механічних і технологічних властивостей полімерної композиції базувалися на стандартних методах дослідження [40].

Висновок до розділу 2

У роботі досліджуються олігомери MF4, MF5, MF6 із вмістом 4, 5, 6 фурфурилоксигруп відповідно. При отриманні ОФОС використовується етилсилікат-40 (ЕТС-40), фурфуроловий спирт і каталізатор.

Полімерна композиція полімеризується за іон-радикальним механізмом в процесі розкриття подвійних зв'язків у фуранових циклах за звичайних температур у приміщенні. При цьому вона за рахунок теплоти полімеризації подвійних зв'язків розігрівається до температури 60...70°C і утворює сітчасту структуру в умовах холодного формування форм та стрижнів. Під час взаємодії компонентів з олігомером ОФОС не утворюється вільного фурфуролового спирту, як, наприклад, у разі використання фуранових смол.

Технологія виготовлення форм та стрижнів з використанням таких полімерних композицій забезпечує екологічну безпеку технологічного процесу внаслідок відсутності виділення отруйних і токсичних речовин, як у «холодній» стадії процесу, так і під час заливки розплавленим металом, охолодження, вибивання та утилізації формувальних сумішей. При цьому повністю відсутня операція вибивання стрижнів з виливків і виливків з форм, з'являється можливість використання дешевого оснащення. Крім того, їхнє використання дає змогу заощаджувати енергоресурси і тим самим зумовлювати зниження загальної собівартості всього технологічного процесу та цільової продукції отримання виливків.

Методики дослідження фізико-механічних і технологічних властивостей полімерної композиції базувалися на стандартних методах дослідження.

РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Моделювання міцності на стиск полімерних композицій

На основі проведених раніше експериментів встановлено, що показники міцності за технологічною пробою при стисненні у полімерної композиції з ОФОС з усіма кислотними каталізаторами, які використовуються, у середньому становлять: через 1год – 1,3...1,54 МПа; через 3год - 2,5...2,9 МПа; через 24год - 4,9...6,1 МПа, що відповідає вимогам, які висуваються до ливарних форм перед заливкою металом.

Особливий інтерес представляє інформація наростання міцності при стисненні полімерної композиції в початковий період часу. Це пов'язано, перш за все, з часом розкриття стрижневого ящика або з часом, коли форма вже готова до заливки. Це один з найважливіших технологічних і економічних параметрів у ливарному виробництві для виготовлення форм і стрижнів. За цей час усувається «відставання» у формуванні міцності полімерної композиції внутрішніх стрижнів стрижня або форм.

На рис. 3.1–3.3 наведено залежність приросту міцності на стиск полімерної композиції протягом трьох годин при використанні ОФОС типів МФ4, МФ5 та МФ6 на різних кислотних каталізаторах.

Графічні залежності отримано шляхом експоненціальної апроксимації даних методом найменших квадратів за рівнянням:

$$Y = C * e^{bx}, \quad (3.1)$$

де c , b – константи, e – основа натурального логарифма.

У результаті обробки даних у досліджуваному інтервалі було встановлено, що наростання міцності полімерної композиції в часі підпорядковується експоненціальному закону. Для всіх експоненціальних кривих було отримано математичні залежності.

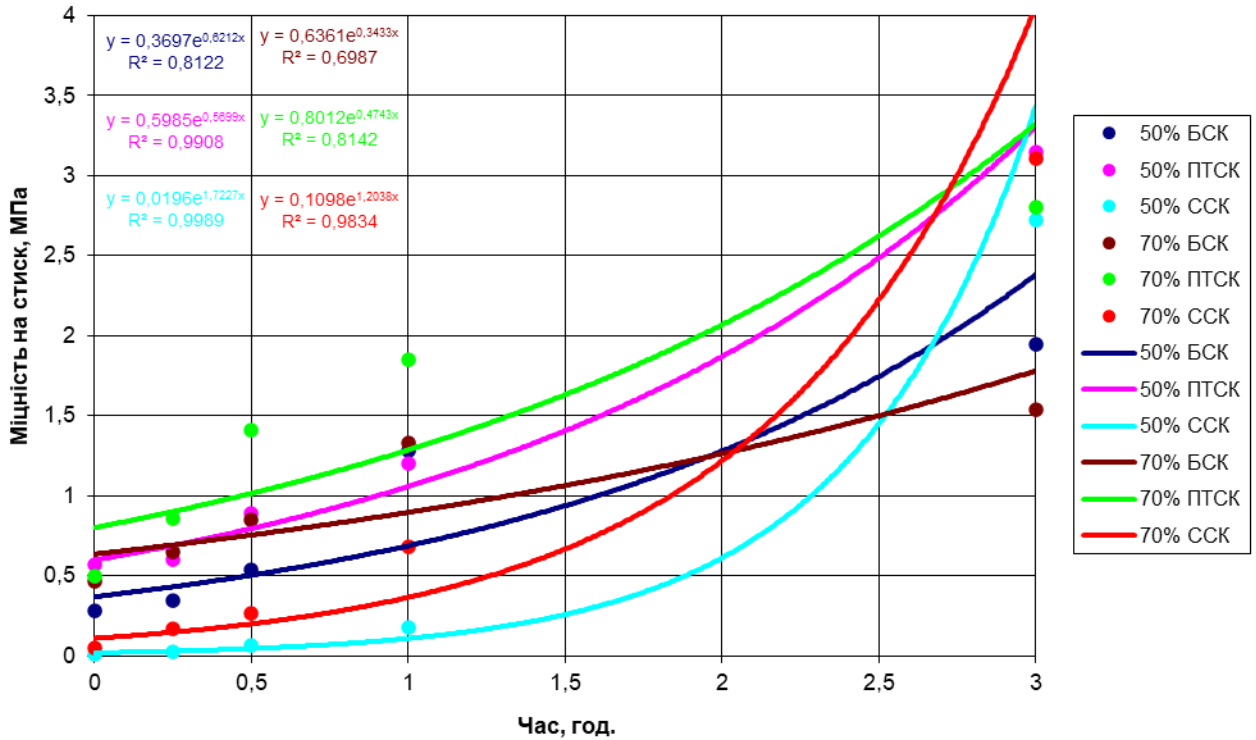


Рисунок 3.1. Кінетичні залежності наростання міцності полімерної композиції з використанням ОФОС типу МФ4 у присутності різних каталізаторів.

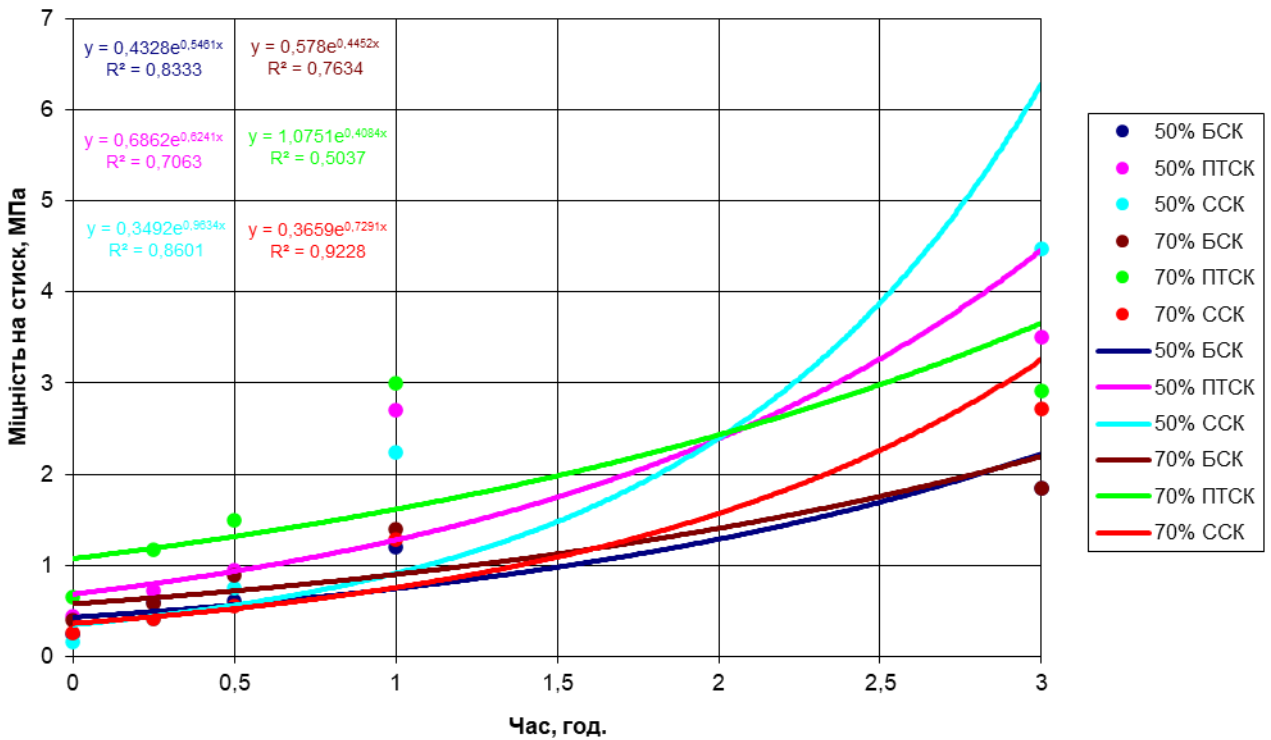


Рисунок 3.2. Кінетичні залежності наростання міцності полімерної композиції з використанням ОФОС типу МФ5 у присутності різних каталізаторів.

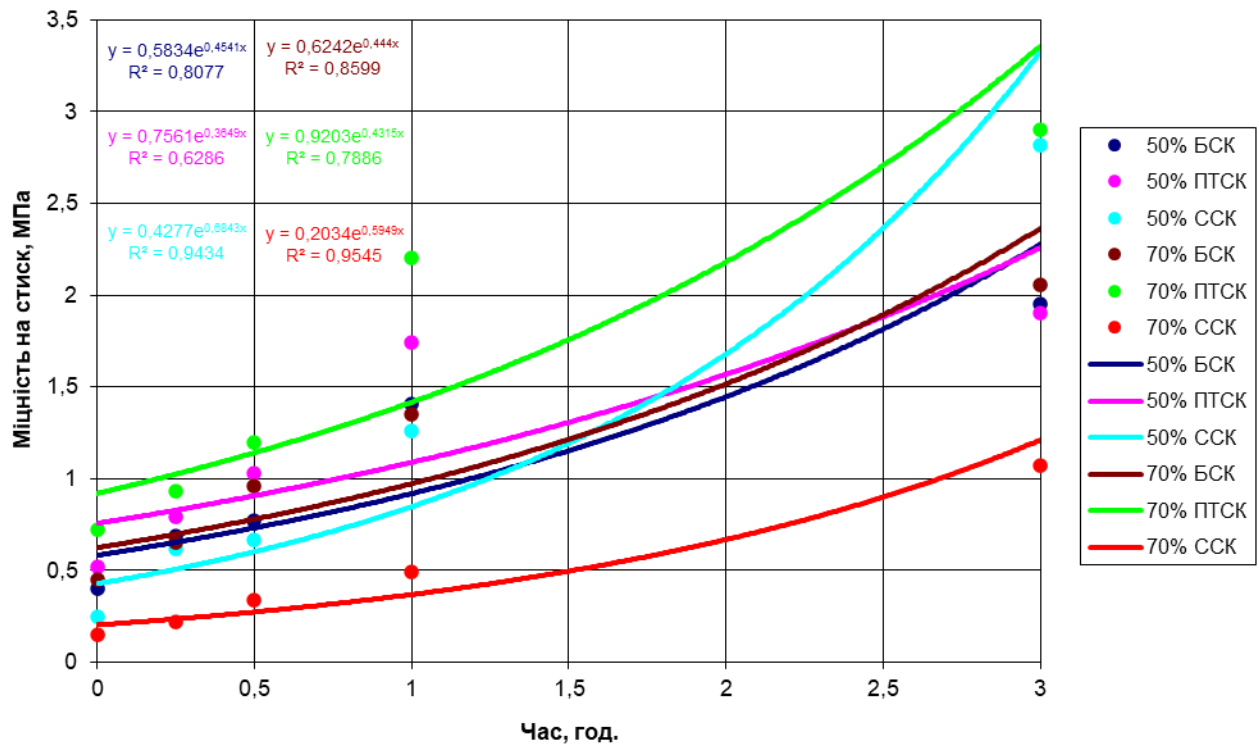


Рисунок 3.3. Кінетичні залежності наростання міцності полімерної композиції з використанням ОФОС типу МФ6 у присутності різних каталізаторів.

У табл. 3.1 наведено математичні залежності наростання міцності полімерної композиції з ОФОС і величина достовірності апроксимації R^2 .

На рис. 3.4 подано експоненціальні залежності наростання міцності полімерної композиції з використанням ОФОС типу МФ4, МФ5, МФ6 за наявності каталізатора 50% БСК.

Встановлення закономірностей наростання міцності полімерної композиції та їх графічне представлення дають змогу подати інформацію в простому та наочному вигляді. Наприклад, порівнюючи міцність полімерної композиції з різними олігомерами (МФ4, МФ5, МФ6), можна зробити висновок, що збільшення ступеня полімеризації n призводить до збільшення її міцності, незалежно від каталізатора.

Таблиця 3.1

Математичні залежності наростання міцності полімерної композиції з ОФОС від типу і концентрації каталізатора.

Кислотний каталізатор	Формула для ОФОС типу		
	МФ4	МФ5	МФ6
50% БСК	$y = 0,3697 e^{0,6212x}$ $R^2 = 0,8023$	$y = 0,4328 e^{0,5461x}$ $R^2 = 0,7421$	$y = 0,3724 e^{0,6026x}$ $R^2 = 0,7861$
50% ПТСК	$y = 0,5985 e^{0,5699x}$ $R^2 = 0,9728$	$y = 0,6168 e^{0,6215x}$ $R^2 = 0,84$	$y = 0,756 e^{0,3649x}$ $R^2 = 0,6543$
50% ССК	$y = 0,0196 e^{1,7227x}$ $R^2 = 0,9491$	$y = 0,3349 e^{0,9615x}$ $R^2 = 0,8102$	$y = 0,4277 e^{0,6849x}$ $R^2 = 0,8381$
70% БСК	$y = 0,6361 e^{0,3433x}$ $R^2 = 0,7048$	$y = 0,578 e^{0,4452x}$ $R^2 = 0,7354$	$y = 0,5137 e^{0,5187x}$ $R^2 = 0,7081$
70% ПТСК	$y = 0,8012 e^{0,4743x}$ $R^2 = 0,7257$	$y = 0,9947 e^{0,4079x}$ $R^2 = 0,7404$	$y = 0,9036 e^{0,4307x}$ $R^2 = 0,8362$
70% ССК	$y = 0,1098 e^{1,2038x}$ $R^2 = 0,8767$	$y = 0,3659 e^{0,7291x}$ $R^2 = 0,8751$	$y = 0,2034 e^{0,5949x}$ $R^2 = 0,895$

Аналіз залежностей показав, що міцність зразків полімерної композиції зростає зі зменшенням концентрації каталізатора, тобто міцність зразків з каталізатором із вмістом кислоти 50 % вища, ніж із вмістом каталізатора 70 %. Це пояснюється високою активністю іонів водню, тому що в складі 50% каталізатора міститься більше води, ніж у складі 70% каталізатора. При звичайних температурах ($t = 25 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C}$) зерна піску мають більш рівномірне обгортання, і реакція з ОФОС відбувається швидше.

Аналіз даних свідчить про те, що зразки з каталізатором ПТСК 50% у даному проміжку часу мають більшу міцність на стиснення, ніж зразки з каталізатором БСК 50%. Початкова міцність на стиснення у зразків з каталізатором ССК зростає повільніше, ніж у зразків з каталізаторами БСК і ПТСК.

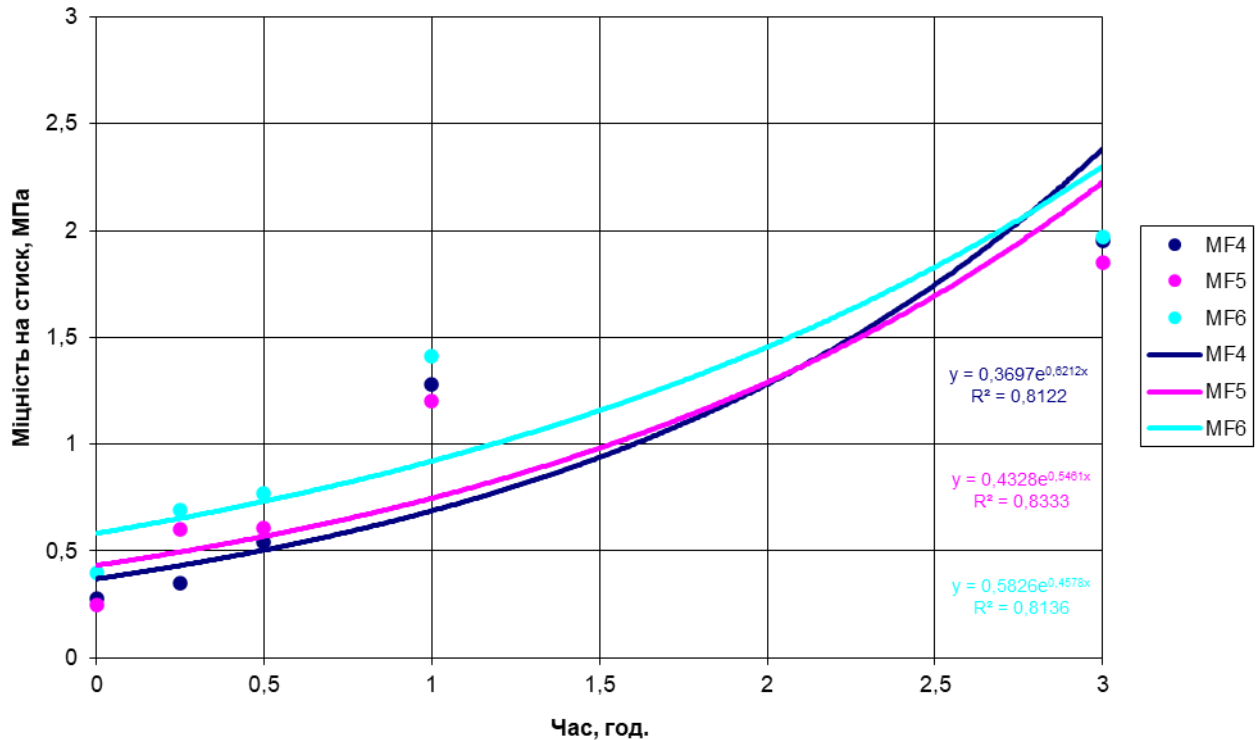


Рисунок 3.4. Порівняльна характеристика полімерної композиції ОФОС типу МФ4, МФ5, МФ6 з каталізатором 50% БСК.

Основний метод регулювання живучості полімерної композиції – зміна міри полімеризації n смоли та її кількості, концентрації та витрати розчину каталізатора. За інших рівних умов, живучість полімерної композиції тим нижча, чим вища температура матеріалів і навколишнього середовища.

Живучість визначається швидкістю затвердіння і залежить, головним чином, від типу полімерної композиції, якості вихідних матеріалів та їх температури, а також від температури навколишнього повітря, інтенсивності та тривалості змішування.

Аналіз даних показав, що живучість сумішей на основі МФ4, МФ5, МФ6 у присутності каталізаторів БСК, ПТСК і ССК перебуває в межах 4...17 хв. Причому збільшення концентрації каталізатора призводить до зменшення живучості. Газоутворювальна здатність у середньому становить 10,5...11,8 см³/г, що є гарним показником для полімерних композицій при виготовленні форм.

Газопроникність полімерної композиції > 200 од. Обсипальність усіх полімерних композицій незначна і знаходиться в межах $0,1...0,36$ %.

Вологість полімерної композиції залежить від концентрації каталізатора наступним чином: при збільшенні концентрації каталізатора її вологість знижується. Вологість полімерної композиції коливається в межах від $0,02$ до $0,06$ %. Вибивання гарне, оскільки в процесі термодеструкції відбувається повне вигорання ОФОС, і полімерна композиція у формі біля виливки та ливникових систем розсипається, а стрижні, як правило, повністю або частково руйнуються. Прилипання полімерної композиції до стрижневого ящика і моделі мінімальні, а пригорання незначне.

3.2 Моделювання оптимальних параметрів і властивостей полімерної композиції

Для моделювання властивостей полімерної композиції на основі ОФОС було проведено запланований експеримент.

У якості параметрів оптимізації (y) були обрані основні фізико-механічні показники властивостей полімерної композиції: міцність на стискання і живучість (y_1 і y_2 відповідно). Вивчалися полімерні композиції з різним відсотковим вмістом олігомеру і каталізатора.

Варійованими факторами були обрані: кількість олігомеру ОФОС, що вводиться (x_3), кількість (x_1) і концентрація (x_2) каталізатора, що використовується. Як каталізатор використовували паратолуолсульфокислоту (ПТСК).

Інтервали варіювання факторів та їх значення на основному, верхньому і нижньому рівнях наведено в табл. 3.2.

Матрицю планування для проведення експерименту 2^{6-3} наведено в табл. 3.3. У математичній моделі враховували не тільки вплив варійованих факторів, а й їхні парні взаємодії.

Таблиця 3.2

Умови проведення експериментів виготовлення полімерної композиції на основі ОФОС.

Фактори	Кількість кислоти, %	Концентрація кислоти, %	Кількість ОФОС, %
Код	x_1	x_2	x_3
Основний рівень	1	60	2
Інтервал варіювання	0,5	10	1
Верхній рівень	1,5	70	3
Нижній рівень	0,5	50	1

Таблиця 3.3

Матриця планування і показники початкових параметрів.

№ випробування	Кількість ПТСК (x_1)	Концентрація ПТСК (x_2)	Кількість ОФОС (x_3)	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	y_1	y_2
1	1,5	70	3	+	+	+	+	+	+	+	1,22	5
2	0,5	70	3	+	-	+	+	-	-	+	0,23	9
3	1,5	50	3	+	+	-	+	-	+	-	1,75	7
4	0,5	50	3	+	-	-	+	+	-	-	0,49	10
5	1,5	70	1	+	+	+	-	+	-	-	0,92	3
6	0,5	70	1	+	-	+	-	-	+	-	0,20	5
7	1,5	50	1	+	+	-	-	-	-	+	1,29	6
8	0,5	50	1	+	-	-	-	+	+	+	0,72	8

Щоб запобігти впливу систематичних помилок, спричинених зовнішніми умовами, дослідження, задані матрицею планування, проводили у випадковому порядку, тобто рандомізовано в часі. Порядок проведення досліджень обирали за таблицею випадкових чисел.

Під час проведення експерименту враховували помилку випробування, тобто дисперсію відтворюваності. Дисперсію відтворюваності оцінювали за результатами паралельних досліджень. Для цього кожне випробування у матриці планування проводили по три рази.

У результаті обробки експериментів було отримано таку систему рівнянь:

$$y_1 = 0,85 + 0,44x_1 - 0,2x_2 + 0,07x_3 + 0,12x_1x_3; [МПа] \quad (3.2)$$

$$y_2 = 6,6 - 1,4x_1 - 1,3x_2 + 1,3x_3 [хв] \quad (3.3)$$

Отримані рівняння можна використовувати для оцінки впливу вхідних параметрів на властивості полімерної композиції, а також для оптимізації її складу.

На основі математичних моделей за технологічною ознакою (циклом затвердіння) розроблено дві групи складів: для полімерної композиції з нормальним циклом затвердіння ОФОС-N (20...40 хв.) і прискореним циклом затвердіння ОФОС-S (5...10 хв.).

Отримані рівняння можна використовувати для оптимізації складу полімерної композиції. За основу прийняли отриману систему рівнянь (3.2) та (3.3).

Під час аналізу отриманих даних встановлено: вплив змінних факторів на параметри оптимізації відповідає теоретичним уявленням про формування властивостей полімерної композиції в процесі її приготування.

3.3 Побудова номограми, яка описує залежності між параметрами технології та властивостями полімерної композиції

Міцність полімерної композиції зростає при збільшенні кількості ОФОС і кількості каталізатора ПТСК. Встановлено, що за досліджуваних концентрацій і

за нормальної температури, чим менша концентрація каталізатора, тим міцність полімерної композиції вища.

Живучість полімерної композиції знижується при збільшенні кількості каталізатора та зменшенні кількості ОФОС. На параметри процесу полімерної композиції також впливають і парні взаємодії початкових складових.

На основі розроблених математичних моделей було побудовано номограму, яка описує залежності між параметрами технології та властивостями полімерної композиції (рис. 3.5). Номограма є засобом графічного розв'язання цієї задачі. Під час побудови номограми вважали, що для умов виробництва міцність на стискання має знаходитися в межах від 1,0 МПа до 1,5 МПа, а живучість – від 7 до 10 хвилин.

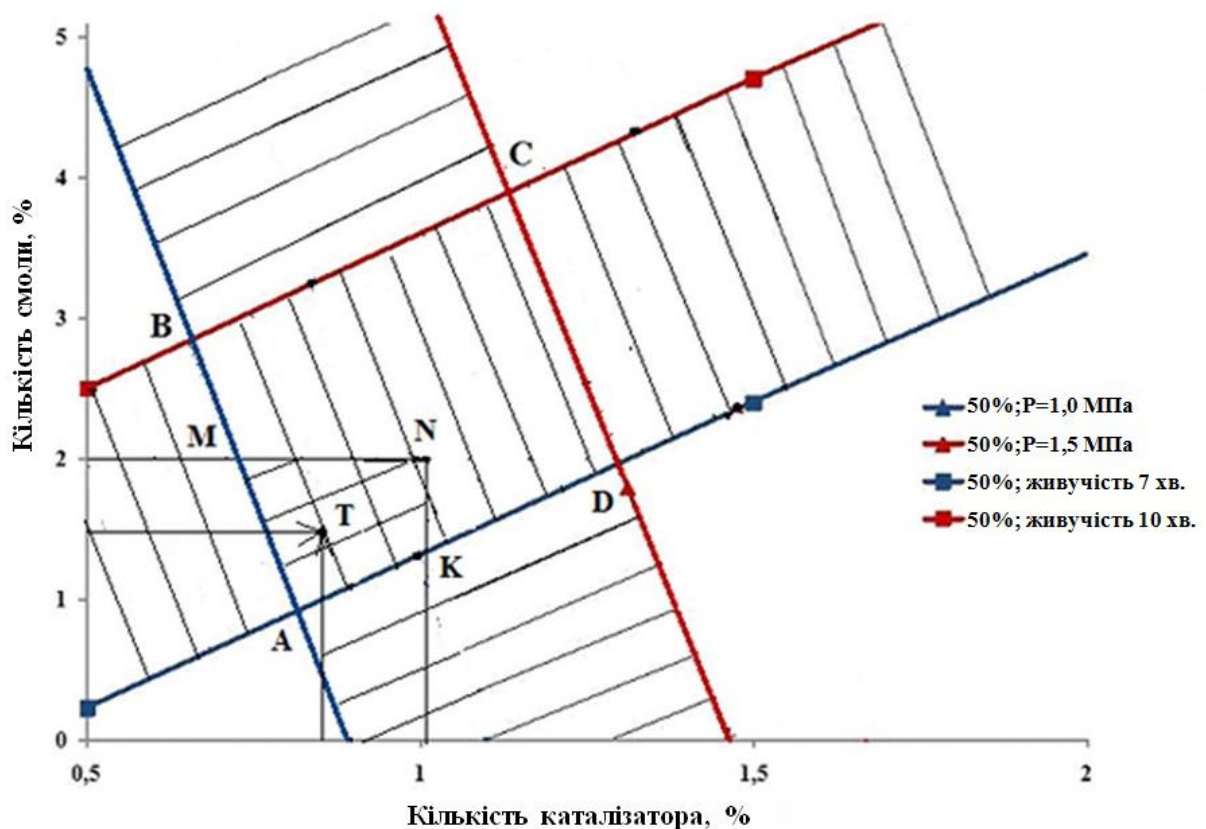


Рисунок 3.5. Номограма для визначення оптимального складу полімерної композиції на основі ОФОС при концентрації каталізатора 50%.

Пряма АВ представляє безліч точок, для яких міцність на стискання дорівнює 1,0 МПа, а пряма CD – 1,5 МПа. Аналогічно для живучості: пряма AD – 7 хвилин, а пряма BC – 10 хвилин. Чотирикутник ABCD є безліччю точок, що задовольняють вимогам до якості полімерної композиції. Якщо вважати, що використання олігомеру ОФОС більше ніж 2,0% і каталізатора більше ніж 1,0% вважається нераціональним використанням матеріалів, то областю оптимальних значень властивостей композиту є область, яку описує багатокутник AMNK.

Наприклад, точка Т на номограмі показує, що за умови використання в суміші ОФОС у кількості 1,5 % і каталізатора - 0,8 % суміш відповідатиме вимогам виробництва. Точка А показує, яку мінімальну кількість складових необхідно взяти, щоб отримати полімерну композицію належної якості.

На основі даних номограми можливе коригування параметрів процесу виготовлення полімерної композиції за рахунок зміни кількості складових, що може бути використане для оперативного управління властивостями полімерної композиції.

Використання номограми дає змогу стабілізувати властивості полімерної композиції холодного тверднення в промислових умовах і дає можливість:

- прогнозувати міцність і живучість полімерної композиції холодного тверднення того чи іншого складу;
- для заданої міцності або живучості визначити необхідний склад полімерної композиції холодного тверднення.

Розроблено технологічний процес приготування стрижневих та формувальних полімерних композицій холодного тверднення на основі ОФОС для отримання якісних виливків. Склад полімерної композиції холодного тверднення, який відповідає вимогам якості виливків, визначається областю значень: для олігомеру ОФОС від 1,0% до 2,0% і для каталізатора ПТСК від 0,6% до 1,0%.

Висновок до розділу 3

Вміст ОФОС у полімерній композиції – основний показник складу, що визначає рівень міцнісних характеристик стрижнів та форм, якість виливків, санітарно-гігієнічні характеристики процесу та його техніко-економічну ефективність. Збільшення міри полімеризації n призводить до збільшення міцності.

Основний метод регулювання живучості – зміна ступеня полімеризації смоли та її кількості, концентрації та витрати розчину каталізатора. Збільшення концентрації каталізатора і ступеня полімеризації смоли призводить до зменшення живучості полімерної композиції. За інших рівних умов, живучість суміші тим нижча, чим вища температура матеріалів і навколишнього середовища.

Встановлено, що міцність полімерної композиції збільшується зі зменшенням концентрації каталізатора, тобто її міцність із каталізатором та за складом кислоти 50% вища, ніж за складом кислоти 70%, що зумовлено великою активністю іонів водню.

Аналіз даних свідчить про те, що полімерна композиція з каталізатором ПТСК мають більшу міцність на стискання, ніж зразки з каталізатором БСК і ССК.

Розроблено технологічний процес приготування стрижневих та формувальних полімерних композицій холодного тверднення на основі ОФОС для отримання якісних виливків. Склад полімерної композиції холодного тверднення, який відповідає вимогам якості виливків, визначається областю значень: для олігомеру ОФОС від 1,0% до 2,0% і для каталізатора ПТСК від 0,6% до 1,0%.

РОЗДІЛ 4.

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Розробка екологічно чистих ливарних форм на основі полімерних композицій може мати значний економічний вплив, особливо в контексті вдосконалення та модернізації виробничих процесів.

Зменшення витрат на енергію та виробничі ресурси. Полімерні композиції можуть бути легкими та мають високу теплоізоляцію, що може допомогти зменшити витрати на енергію при виробництві та поліпшити термічну ефективність процесу литва металу. Використання полімерних композицій для ливарних форм може зменшити витрати на виробництво, оскільки полімери часто можуть бути більш доступними та економічно вигідними порівняно з традиційними матеріалами.

Зменшення витрат на обслуговування та заміну форм. Полімерні матеріали можуть бути менш вразливими до корозії та ерозії, що може призвести до зменшення витрат на обслуговування та продовжити термін служби ливарних форм. Це важливо для зменшення частоти їх заміни та підтримання стабільності виробництва. Полімерні композиції зазвичай мають меншу густину та можуть вимагати менше енергії для виготовлення та транспортування порівняно з традиційними матеріалами, що призводить до енергозбереження та зниження витрат.

Зменшення витрат на відходи та обробку. Використання екологічно чистих полімерних композицій може сприяти зменшенню кількості відходів, адже вони можуть бути піддаються переробці чи вторинному використанню. Це може зменшити витрати на обробку та утилізацію відходів.

Зменшення ваги ливарних форм. Полімерні композиції зазвичай легші за багато металевих матеріалів, що може призвести до зменшення ваги ливарних форм. Це полегшує їх транспортування, зменшує витрати на вантажні перевезення та може поліпшити обробку та управління ливарними формами.

Скорочення часу литва та підготовки. Деякі полімерні матеріали можуть мати швидші часи затвердіння, що може призвести до скорочення часу литва та підготовки ливарних форм. Це важливо для підвищення продуктивності та оптимізації виробничих процесів.

Підвищення терміну служби ливарних форм. Полімерні композиції можуть мати високу стійкість до корозії, абразії та інших агресивних середовищ, що може подовжити термін служби ливарних форм та зменшити витрати на їхню заміну.

Вдосконалення технологій литва. Застосування нових матеріалів може вимагати впровадження сучасних технологій литва, що може покращити ефективність та точність виробничих процесів.

Зменшення ризиків екологічних порушень. Використання екологічно чистих матеріалів може допомогти уникнути можливих ризиків екологічних порушень та пов'язаних з цим податкових штрафів, що може значно зменшити фінансові витрати компанії.

Використання екологічно чистої сировини. Вибір полімерних композицій, які не містять шкідливі речовини, може відповідати стандартам щодо екологічної безпеки та безпечності працівників. Це може запобігти витратам на вирішення екологічних проблем та податкових штрафів.

Підвищення якості виробів. Використання нових екологічно чистих матеріалів може покращити якість ливарних виробів, зменшуючи кількість браку та відмов на виробничому етапі.

Підвищення конкурентоспроможності. Виробництво з використанням екологічно чистих технологій може зробити продукцію більш привабливою для екологічно свідомих споживачів, що може підвищити конкурентоспроможність компанії.

Підтримка інновацій та формування позитивного іміджу. Застосування нових технологій у виробництві ливарних форм може позитивно впливати на імідж компанії, підтримувати її інноваційний підхід та привертати увагу покупців.

Висновок до розділу 4

Використання полімерних композицій для ливарних форм може зменшити витрати на виробництво, оскільки полімери часто можуть бути більш доступними та економічно вигідними порівняно з традиційними матеріалами.

Використання екологічно чистих полімерних композицій може сприяти зменшенню кількості відходів, адже вони можуть бути піддаються переробці чи вторинному використанню. Це може зменшити витрати на обробку та утилізацію відходів.

Виробництво з використанням екологічно чистих технологій може зробити продукцію більш привабливою для екологічно свідомих споживачів, що може підвищити конкурентоспроможність компанії.

Загалом, розробка екологічно чистих ливарних форм на основі полімерних композицій може призвести до значних економічних вигід, зокрема, зменшення витрат на енергію, обслуговування та відновлення, а також підвищення продуктивності та покращення сталості виробництва.

Враховуючи ці фактори, розробка екологічно чистих ливарних форм може виявитися вигідною з точки зору якісної та ефективної виробничої діяльності, а також з економічного погляду в довгостроковій перспективі.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1 Небезпечні й шкідливі виробничі чинники при застосуванні полімерних композицій

У сучасних умовах при проектуванні виробництва полімерних матеріалів необхідно проводити екологічну оцінку виробництва, експлуатації та утилізації.

Залежно від методу утворення полімерні матеріали поділяють на 4 класи [41]:

А. Пластичні маси на основі високомолекулярних сполук, що їх отримують за допомогою ланцюгової полімеризації.

Б. Пластичні маси на основі високомолекулярних сполук, які отримують поліконденсацією і ступеневою полімеризацією.

В. Пластичні маси на основі природних хімічних модифікованих полімерів.

Г. Пластичні маси на основі природних та нафтових асфальтів і смол, які отримують деструкцією різноманітних органічних речовин [42].

До композиції полімерного матеріалу вводять речовини, що їх зв'язують (пластифікатори, стабілізатори, каталізатори, інгібітори, розчинники, антиоксиданти, антистатики тощо) [43].

У виробництві полімерних матеріалів використовуються найрізноманітніші хімічні речовини, причому поряд з основними компонентами (мономерами) для їх виготовлення застосовують різні добавки (наповнювачі, отверджувачі, каталізатори, пластифікатори, мастила, стабілізатори та інші допоміжні речовини), тому виробництво полімерних та полімеромісних матеріалів повинно здійснюватися відповідно до вимог нормативно-технічної та технологічної документації [26].

Характер несприятливої дії продуктів синтезу полімерних сполук на організм працюючих визначається, в-першу чергу, токсичністю мономерів. Більшість з них виділяються в процесі поліконденсації, дуже реактивні та

біологічно агресивні. Виробничий контакт з цими речовинами може викликати ураження шкіри і слизових оболонок, печінки, органів дихання, центральної нервової системи, індукувати канцерогенез, алергійні захворювання, відобразитися на репродуктивній функції організму [26].

Несприятливий вплив на організм чинять і деякі добавки, які застосовуються у виробництві полімерних сполук. Їх токсичність може бути навіть більш виражена, ніж токсичність основного полімера. Використання при виготовленні пластмас різних наповнювачів, які в основному являють собою порошкоподібні компоненти, нерідко призводить до запилення повітря робочої зони, що може призвести до бронхолегеневої захворюваності працюючих. Джерелом пилоутворення є також стадії сушіння, дроблення, шліфування, просівання деяких полімерів. При виробництві полімерних сполук, та її переробці, яке супроводжується виділенням у повітря робочої зони різноманітних за характером дії газоподібних речовин і пилу, може залежно від їх концентрації та тривалості впливу призводити до розвитку різних змін в організмі працюючих. Діапазон цих порушень досить широкий – від змін окремих показників гемостазу до розвитку гострих і хронічних інтоксикацій і захворювань. Клінічні прояви останніх залежать від переважання тих чи інших компонентів, що використовуються при виробництві та обробці полімерних сполук [26].

Оскільки основними компонентами цих сполук є мономери, саме від характеру їх дії на організм і залежить в основному клінічна картина професійної патології у працюючих [26].

Гігієнічні вимоги до полімерних матеріалів залежать від галузі їх застосування. Найважливіше, щоб полімерні матеріали були нешкідливими в токсикологічному відношенні. Полімерні матеріали не повинні погіршувати органолептичні властивості навколишнього середовища, не повинні спричинювати рефлекторних та резорбтивних загально токсичних реакцій, а також алергенної і мутагенної дії. Вони не повинні чинити пірогенної дії, не стимулювати розвиток мікрофлори на своїй поверхні і в середовищах, які з ними

контактують, не утворювати статичні електричні поля, не погіршувати мікроклімат приміщень [26].

Профілактичні заходи для оздоровлення умов праці повинні бути спрямовані на гігієнічну стандартизацію рецептурних сумішей і сировини з метою обмеження в них вмісту шкідливих чинників, заміну високотоксичних компонентів менш токсичними, удосконалення технологічного устаткування.

5.2 Основні небезпечні й шкідливі виробничі чинники в ливарних цехах

У ливарних цехах основними небезпечними й шкідливими виробничими чинниками є: пил, пари й газу, надлишкова теплота, підвищений рівень шуму, вібрацій, електромагнітних випромінювань, машини й механізми, що рухаються, рухливі частини виробничого устаткування та інше [27].

Пил ливарних цехів дрібнодисперсний. До 90 % порошин пилу мають розміри менш 2 мкм. При очищенні виливків виділяється пил, що містить більше 90 % двоокису кремнію, а при вибиванні виливків – близько 99 %. Так, при очищенні виливків у барабанах вміст двоокису кремнію у виділеннях пилу доходить до 94,3 %, а при вибиванні виливків – до 99,2 %. Двоокис кремнію входить також до складу пилу формувальних і стрижневих сумішей. При плавлі легованих сталей і кольорових металів у повітря робочої зони можуть виділятися аерозолі конденсації окислів марганцю, цинку, ванадію, нікелю й багатьох інших металів та їх сполук. До газів і парів, якими забруднюється повітря робочої зони ливарних цехів, відносять акролеїн, ацетон, ацетилен, бензол, окис азоту, окис вуглецю, двоокис сірки, уротропін, вуглекислий газ, фенол, формальдегід, хлор, етиловий спирт та інші [27].

Окис вуглецю є основним шкідливим виробничим чинником у чавуно- і сталеливарних цехах. Джерела виділення окису вуглецю – вагранки й інші плавильні агрегати, а також залиті форми у процесі остигання, сушильні печі, агрегати поверхневого підсушування форм й ін. Наприклад, концентрація окису вуглецю в колошникових газах вагранок досягає 15 %. Кількість окису вуглецю,

що виділяється при заливанні чавуну й сталі, залежить від часу перебування вилівка в цеху й маси виливків (при заливанні чавуну у форми для одержання виливків масою 10 - 200 кг виділяється 40 - 500 г СО на 1 т залитого металу) [27].

Вуглекислий газ, що застосовується для хімічного сушіння (твердіння) піщано-глинистих форм, не токсичний, однак при великій кількості його в повітрі робочої зони вміст кисню зменшується, що може викликати погане самовідчуття й навіть явище удушення (асфіксію) [27].

Надлишкове виділення тепла здійснюється основним технологічним устаткуванням – плавильними агрегатами й становить від 14 до 62 % від загальної витрати тепла на розплавлення металу. При розплавленні металу виділення тепла становить близько 3000 МДж на тонну металу. Інтенсивність теплового потоку на ряді робочих місць досягає високих значень. Відомо, що інтенсивність теплового потоку менш $0,7 \text{ кВт/м}^2$ не викликає неприємного відчуття, якщо діє протягом декількох хвилин, а понад $3,5 \text{ кВт/м}^2$ уже через 2 с викликає печію. Крім того, наслідки впливу теплового потоку на організм людини залежать від спектральної характеристики випромінювання. Найбільш проникну до організму людини здатність мають інфрачервоні промені з довжиною хвилі до 1,5 мкм (вони не поглинаються шкіряним покривом), а на шкіру найбільше різко діють промені з довжиною хвилі понад 1,5 до 3 мкм [28].

Джерелами загальної вібрації у ливарних цехах є ударні дії вибивних решіток, пневматичні формувальні, відцентрові й інші машини, що призводять до струсу підлоги й інших конструктивних елементів будівлі, а джерелами локальної вібрації – пневматичні рубильні молотки, трамбівки й т. п. Найбільші рівні шуму характерні для дільниць формування, вибивки виливків, зачищення, обрубки й деяких інших. Ультразвук у ливарних цехах застосовується для обробки рідких розплавів, очищення виливків, а також в установках і системах очищення газів. Для цього використовують генератори з діапазоном частот 18-22 кГц [27].

Електромагнітні поля в ливарних цехах генеруються електротермічними установками для плавлення й нагрівання металу, сушіння форм і стрижнів й ін.

Вимоги до розміщення високочастотних установок зазначені у Правилах безпеки при експлуатації електротермічних установок підвищеної й високої частоти. Джерела іонізуючих випромінювань у ливарному виробництві застосовують для плавлення, виявлення дефектів у виливків, контролю й автоматизації технологічних процесів та ін. Основними джерелами небезпеки поразки електричним струмом у ливарних цехах є електропечі, машини й механізми з електроприводом. Застосовуване електроустаткування в основному працює при напрузі до 1000 В, при використанні електротермічних установок – вище 1000 В [28].

Ливарні цехи оснащені транспортними й вантажопідійомними механізмами; машинами для готування формувальних і стрижневих сумішей і сполук, форм і стрижнів; пристроями для вибивки виливків; різноманітними механізмами для фінішних операцій та ін. Виконання кожної з операцій на зазначеному устаткуванні пов'язане з небезпекою травмування обслуговуючого персоналу через наявність небезпечних зон у машинах і механізмах [27].

5.3 Екологізація виробництва в процесі виготовленні ливарних форм на основі полімерних композицій

У ливарному виробництві підприємство насамперед приділяє особливо важливе значення технології виробництва, якості виливків та можливості автоматизації праці. Екологічність виробництва підприємство зазвичай залишає на останній план. Але насправді екологічні параметри сильно впливають на виробництво. Велика кількість викидів призводить до того, що підприємство сплачує великі штрафи. Шкідливі речовини в робочих приміщеннях вкрай негативно впливають на здоров'я працівників, і тим самим збільшується витрати на медичне обслуговування службовців. Забруднення природи через певний час впливатиме і здоров'я населення і природні ресурси. Питання екології вкрай важливе у будь-якому виробництві [43].

Найбільш важливими інженерними рішеннями є автоматизація ливарних процесів та можливість багаторазового використання форм. Вони визначають

реалізацію практично всіх вимог споживача, причому всі інженерні рішення визначають екологічність технології. Відмова від них істотно погіршить атрибути, затребувані споживачем, отже знизить ринковий потенціал [43].

Технологічні процеси ливарного виробництва є одними з найнебезпечніших з позиції екології та охорони праці. Викиди в атмосферу, тверді та рідкі відходи ливарних процесів є вкрай згубними для довкілля [43].

5.4 Основні засоби зменшення шкідливих викидів у навколишнє середовище підприємствами ливарного виробництва

Засоби очищення газоповітряних викидів. Підприємства, діяльність яких пов'язана з викидами забруднюючих речовин в атмосферу, повинні бути оснащені спорудженнями, устаткуванням і апаратурою для очищення викидів в атмосферу, засобами контролю за кількістю й складом забруднюючих речовин [44].

Апарати сухого інерційного очищення газів від домішок. У цій групі апаратів відділення домішок від газового потоку здійснюється механічно при використанні гравітаційних, інерційних і відцентрових сил. Основна їхня перевага – простота конструкції. Однак ефективність очищення невисока, тому данні апарати застосовують для грубого очищення газів [44].

Апарати мокрого очищення газів від твердих і рідких домішок. Апарати працюють за принципом осадження часток домішок на поверхню крапель або плівки рідини. Процес очищення тим ефективніше, чим краще змочуються домішки рідиною. Найчастіше в якості зрошувальної рідини використовується вода. Ці апарати мають широке використання, тому що характеризуються, по-перше, високою ефективністю очищення від дрібнодисперсного пилу, по-друге, можливістю очищення гарячих газів, і, по-третє, можливістю очищення вибухонебезпечних газів. Однак вони мають низку недоліків: 1) утворення у процесі очищення шламу, що вимагає спеціальних систем для його переробки, 2) винос вологи в атмосферу, 3) необхідність створення оборотних систем подачі води [44].

Апарати для очищення газів від твердих і рідких домішок методом фільтрації. Процес очищення газів від твердих або рідких часток за допомогою пористих середовищ називається фільтрацією. Фільтри бувають [44]:

- зернисті. Можуть працювати при 700 - 1100 К в умовах агресивних середовищ, витримують механічні навантаження, перепади температур і тисків. Вони бувають трьох типів: 1) зернисті, у яких уловлювальні елементи (галька, гравій, пісок, гранули) не зв'язані жорстко один з одним, 2) тверді пористі, у яких зерна міцно зв'язані одне з одним у результаті спікання або склеювання (пориста кераміка, пластмаси), 3) напівтверді (в'язанні й тканині).

- волокнисті. Виготовляють із шарів волокнистих матеріалів різної товщини: 1) тонковолокнисті, являють собою шари синтетичних волокон діаметром 1 - 2 мкм, нанесені на марлеву підложку або основу з більш товстих волокон, застосовуються для тонкого очищення високодисперсних аерозолів, регенерація їх практично неможлива; 2) грубоволокнисті, застосовуються для грубого очищення, їх можна легко регенерувати або замінити.

- тканинні. Фільтрувальним матеріалом є різні тканини: бавовняні, вовняні, лавсанові й інші.

Електричне очищення – один з найбільш досконалих видів очищення газів, що засновується на ударній іонізації газу в зоні коронуючого розряду, передачі заряду іонів часткам домішок й осадженні останніх на осаджувальних і коронуючих електродах. Аерозольні частки забруднювачів адсорбують на своїй поверхні іони, одержують заряд і рухаються у бік електрода із протилежним знаком заряду. У міру накопичення на електродах частки забруднювачів видаляються струшуванням або за допомогою промивання електродів [44].

Методи очищення промислових викидів від газоподібних забруднювачів за характером протікання фізико-хімічних процесів поділяють на п'ять основних груп [43]:

- 1) промивання викидів розчинниками домішок (абсорбція),
- 2) промивання викидів розчинами реагентів, що зв'язують домішки хімічно (хемосорбція),

3) поглинання газоподібних домішок твердими активними речовинами (адсорбція),

4) термічна нейтралізація забруднених газів,

5) поглинання домішок з використанням каталізатора.

Метод абсорбції полягає в розподілі газоповітряної суміші на складові шляхом поглинання одного або декількох газових компонентів (абсорбатів) суміші рідким поглиначем (абсорбентом). Метод хемосорбції заснований на поглинанні газів і пари твердими або рідкими поглиначами з утворенням малолетких або малорозчинних хімічних сполук. Хемосорбцію застосовують в основному для очищення технологічних газів від сірководню, хлору, сірчистого ангідриду. Метод адсорбції заснований на властивостях деяких твердих тіл вибірково поглинати й концентрувати на своїй поверхні окремі компоненти з газової суміші. В якості адсорбентів застосовують речовини, що мають велику площу поверхні на одиницю маси. Адсорбенти застосовуються для очищення вихлопних газів автомобілів, видалення отрутних компонентів, радіоактивної пари при експлуатації ядерних реакторів, зокрема радіоактивного йоду. Термічна нейтралізація заснована на здатності токсичних компонентів окислюватися до менш токсичних. Даний метод має переваги перед методами адсорбції й абсорбції, які полягають у відсутності шламів, малих габаритах установок, простоті їхнього обслуговування, високої ефективності знешкодження при низькій вартості очищення. Каталітичний метод використовують для окислювання токсичних компонентів промислових викидів з використанням додаткових речовин – каталізаторів. Перевагою методу є короткочасність протікання процесу (іноді частки секунди), малі габарити реактора, низькі температури в порівнянні з термічною нейтралізацією, незначні кількості каталізатора [43].

Висновки до розділу 5

При розробленні нових методів отримання полімерів на основі реакцій полімеризації, поліконденсації та модифікації полімерів особливо важливим є урахування екологічних законів при синтезі полімерів, удосконалення технології отримання полімерних матеріалів, безпечних для навколишнього середовища. Розробляються технології: впровадження іонних рідин під час виробництва полімерів; підбору пластифікаторів; використання золь-гель технології; застосування фулеренів у реакціях полімеризації, синтезу «екологічно чистих полімерів».

Гігієнічні вимоги до полімерних матеріалів залежать від галузі їх застосування. Найважливіше, щоб полімерні матеріали були нешкідливими в токсикологічному відношенні. Полімерні матеріали не повинні погіршувати органолептичні властивості навколишнього середовища, не повинні спричинювати рефлекторних та резорбтивних загально токсичних реакцій, а також алергенної і мутагенної дії. Вони не повинні чинити пірогенної дії, не стимулювати розвиток мікрофлори на своїй поверхні і в середовищах, які з ними контактують, не утворювати статичні електричні поля, не погіршувати мікроклімат приміщень.

Профілактичні заходи для оздоровлення умов праці повинні бути спрямовані на гігієнічну стандартизацію рецептурних сумішей і сировини з метою обмеження в них вмісту шкідливих чинників, заміну високотоксичних компонентів менш токсичними, удосконалення технологічного устаткування.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню та оптимізації основних властивостей екологічно чистої полімерної композиції на основі олігофурфурілоксисилоксанів (ОФОС), яка може бути використана для виготовлення ливарних форм і стрижнів при виробництві виливків із чорних і кольорових металів.

Олігомер ОФОС для виготовлення ливарних форм та стрижнів, на основі продуктів переестерифікації етилсилікату-40 (ЕТС-40) та фурфурілового спирту, являє собою екологічно чисту зв'язувальну речовину, що за своїми властивостями стосовно швидкості затвердіння піщаних композицій та швидкості набору їхньої міцності на стискання, відповідає зарубіжним аналогам.

Показники міцності полімерної композиції за технологічною пробою на стискання у олігомері ОФОС з усіма застосованими кислотними каталізаторами в середньому становлять: через 1 год - 0,8...1,5 МПа; через 3 год - 1,8...2,9 МПа; через 24 год - 4,9...6,1 МПа, що відповідає вимогам, які висувають до ливарних форм перед заливанням металом.

Вміст ОФОС у полімерній композиції - основний показник складу, що визначає рівень міцнісних характеристик стрижнів та форм, якість виливків, санітарно-гігієнічні характеристики процесу та його техніко-економічну ефективність. Збільшення міри полімеризації n призводить до збільшення міцності.

Основний метод регулювання живучості - зміна ступеня полімеризації смоли та її кількості, концентрації та витрати розчину каталізатора. Збільшення концентрації каталізатора і ступеня полімеризації смоли призводить до зменшення живучості полімерної композиції. За інших рівних умов, живучість суміші тим нижча, чим вища температура матеріалів і навколишнього середовища.

Встановлено, що міцність полімерної композиції збільшується зі зменшенням концентрації каталізатора, тобто її міцність із каталізатором та за

складом кислоти 50% вища, ніж за складом кислоти 70%, що зумовлено великою активністю іонів водню.

Для моделювання властивостей полімерної композиції на основі ОФОС було проведено планований експеримент. Параметрами оптимізації було обрано основні показники властивостей формувальної полімерної композиції холодного тверднення: міцність на стискання і живучість. Варійованими факторами були обрані: кількість введеної до олігомеру ОФОС, кількість і концентрація використовуваного каталізатора.

Під час аналізу рівнянь регресії можна відзначити таке: вплив варійованих факторів на параметри оптимізації відповідає теоретичним уявленням про формування властивостей полімерної композиції низького тверднення в процесі її приготування.

Міцність полімерної композиції зростає зі збільшенням кількості ОФОС і кількості каталізатора ПТСК. Встановлено, що за досліджуваних концентрацій і за нормальної температури, чим менша концентрація каталізатора, тим міцність полімерної композиції вища.

Живучість полімерної композиції знижується зі збільшенням кількості каталізатора та зменшенням кількості ОФОС. На параметри процесу полімерної композиції також впливають і парні взаємодії вихідних складових.

Розроблено технологічний процес приготування стрижневих і формувальних полімерних композицій холодного тверднення на основі ОФОС для отримання якісних виливків. Склад полімерної композиції холодного тверднення, який задовольняє вимоги до якості виливків, визначається областю значень: для олігомеру ОФОС від 1,0% до 2,0% і для каталізатора ПТСК від 0,6% до 1,0%.

На основі математичних моделей за технологічною ознакою (циклом затвердіння) розроблено дві групи сумішей: для сумішей із нормальним циклом затвердіння ОФОС-N (20...40 хвилин) та прискореним циклом затвердіння ОФОС-S (5...10 хвилин).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sivarupan, T.; Balasubramani, N.; Saxena, P.; Nagarajan, D.; Mansori, M.E.; Salonitis, K.; Jolly, M.; Dargusch, M.S. A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting. *Additive Manufacturing* 2021, 40, 101889, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101889>.
2. Prakash, C.; Singh, S.; Kopperi, H.; Ramakrihna, S.; Mohan, S.V. Comparative job production based life cycle assessment of conventional and additive manufacturing assisted investment casting of aluminium: A case study. *Journal of Cleaner Production* 2021, 289, 125164, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125164>.
3. Lubimyi, N.S.; Polshin, A.A.; Gerasimov, M.D.; Tikhonov, A.A.; Antsiferov, S.I.; Chetverikov, B.S.; Ryazantsev, V.G.; Brazhnik, J.; Ridvanov, I. Justification of the Use of Composite Metal-Metal-Polymer Parts for Functional Structures. *Polymers* 2022, 14, 352, <https://doi.org/10.3390/polym14020352>
4. Nayak, R.K.; Venugopal, S. Prediction of shrinkage allowance for tool design of aluminium alloy (A356) investment casting. *Materials Today: Proceedings* 2018, 5(11), Part 3, 24997–25005, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.300>.
5. Senthil, J.; Prabhakar, M.; Thiagarajan, C.; Prakash, S.; Lakshmanan, R. Studies on performance and process improvement of implementing novel vacuum process for new age castings. *Materials Today: Proceedings* 2020, 33(1), 813–819, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.269>.
6. Kuo, C.-C.; Nguyen, T.-D.; Zhu, Y.-J.; Lin, S.-X. Rapid Development of an Injection Mold with High Cooling Performance Using Molding Simulation and Rapid Tooling Technology. *Micromachines* 2021, 12, 311, <https://doi.org/10.3390/mi12030311>
7. Gacs, J.; Vernon, Z.; Kocsis, L.; et al. Epoxy mold adhesion on various plasma-treated thermoplastic polymer surfaces. *Int J Adv Manuf Technol* 2022, <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09049-8>
8. Rajaguru, J.; Duke, M.; Au, C. Development of rapid tooling by rapid prototyping technology and electroless nickel plating for low-volume production of

plastic parts. *Int J Adv Manuf Technol* 2015, 78, 31, <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6619-4>

9. Liu, F.; Fan, Z.; Liu, X.; et al. Aqueous gel casting of water-soluble calcia-based ceramic core for investment casting using epoxy resin as a binder. *Int J Adv Manuf Technol* 2016, 86, 1235.

10. Kuo, C.-C.; Xu, J.-Y.; Zhu, Y.-J.; Lee, C.-H. Effects of Different Mold Materials and Coolant Media on the Cooling Performance of Epoxy-Based Injection Molds. *Polymers* 2022, 14, 280. <https://doi.org/10.3390/polym14020280>

11. Mohanty, U.K.; Sarangi, H. Solidification of Metals and Alloys. In *Casting Processes and Modelling of Metallic Materials*, Abdallah, Z.; Aldoumani, N., Eds.; IntechOpen: London, 2021, <https://doi.org/10.5772/intechopen.94393>.

12. Gutowski, W.S.; Błędzki, A.K. Fast-Setting Permeable Alkyd/Polyester Composites: Moulding Sands. *Polymers* 2021, 13, 4386. <https://doi.org/10.3390/polym13244386>

13. Hamasaiid, A.; Dargusch, M.S.; Davidson, C.; Tovar, S.; Loulou, T.; et al. Effect of Mold Coating Materials and Thickness on Heat Transfer in Permanent Mold Casting of Aluminium Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2007, 38(6), 1303–1316, <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9145-2>

14. Prabhakar, A.; Papanikolaou, M.; Salonitis, K.; Jolly, M. Minimising Defect Formation in Sand Casting of Sheet Lead: A DoE Approach. *Metals* 2020, 10, 252. <https://doi.org/10.3390/met10020252>

15. Chen, S.; Kaufmann, T. Development of Data-Driven Machine Learning Models for the Prediction of Casting Surface Defects. *Metals* 2022, 12, 1. <https://doi.org/10.3390/met12010001>

16. Grimzin, I.; Ponomarenko, O.; Marynenko, D.; Yevtushenko, N.; Berlizeva, T. The Technological Process of Obtaining Sand-Plaster Molds for Complex Thin-Walled Aluminum Castings. In *Proceedings of the Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2019)*, Odessa, Ukraine, 7-10 September 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_41

17. Aliotta, L.; Sciara, L.M.; Cinelli, P.; Canesi, I.; Lazzeri, A. Improvement of the PLA Crystallinity and Heat Distortion Temperature Optimizing the Content of Nucleating Agents and the Injection Molding Cycle Time. *Polymers* 2022, 14, 977. <https://doi.org/10.3390/polym14050977>

18. Mohapatra, S.; Sarangi, H.; Kumar, U. Mohanty Effect of processing factors on the characteristics of centrifugal casting. *Manufacturing Rev* 2020, 7, 26. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2020024>

19. Ponomarenko, O.; Grimzin, I.; Yevtushenko N.; Lysenko, N.; Marynenko, D. Advanced Technologies of Manufacturing Readily Removable Cores for Obtaining High-Quality Castings. In Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, Lviv, Ukraine, 8-11 June 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_56

20. Thu, A.H.; Zakharov, A.I. Preparation of Inorganic Binder for Cold-Hardening Mixtures. *Refract Ind Ceram* 2018, 59, 313–317. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0227-z>

21. Akimov, O.; Penzev, P.; Marynenko, D.; Saltykov, L. Identification of the behavior of properties of a cold-hardening glass-liquid mixture with propylene-carbonate different in dosing components. *Technology Audit and Production Reserves* 2018, 2(3(46)), 4–9. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.169748>

22. Körber, S.; Moser, K.; Diemert, J. Development of High Temperature Resistant Stereocomplex PLA for Injection Moulding. *Polymers* 2022, 14, 384. <https://doi.org/10.3390/polym14030384>

23. Czarnecka-Komorowska, D.; Grześkowiak, K.; Popielarski, P.; Barczewski, M.; Gawdzińska, K.; Popławski, M. Polyethylene Wax Modified by Organoclay Bentonite Used in the Lost-Wax Casting Process: Processing–Structure–Property Relationships. *Materials* 2020, 13, 2255. <https://doi.org/10.3390/ma13102255>

24. Webb, H.K.; Arnott, J.; Crawford, R.J.; Ivanova, E.P. Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly(ethylene terephthalate). *Polymers* 2013, 5, 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym5010001>

25. Chamas, A.; Moon, H.; Zheng, J.; Qiu, Y.; Tabassum, T.; Jang, J.H.; Abu-Omar, M.; Scott, S.L.; Suh, S. Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2020, 8(9), 3494–3511.
26. Вальтер, О. І. Основи ливарного виробництва : підручник / О. І. Вальтер, О. А. Протопопов. - Вологда : Інфра-Інженерія, 2019. - 332 с.
27. Пономаренко О. І. Управління ливарними системами і процесами Монографія / О. І. Пономаренко, Т. В. Лисенко, О. Л. Становський, О. І. Шинський. - Харків: Підручник НТУ "ХП", - 2012. - 368 с.
28. Кукуй Д.М. Теорія і технологія ливарного виробництва. / Д.М. Кукуй, В.А. Скворцов, В.К. Ектова. - Дизайн ПРО, 2000. - 416 с.
29. Белов, В. Д. Ливарне виробництво : підручник / В. Д. Белов ; під редакцією В. Д. Белова. - 3-е вид., перероб. і доп. - : МІСІС, 2015. - 487 с.
30. Шаров, М. В. Теоретичні основи ливарного виробництва : конспект лекцій / М. В. Шаров ; Всеросійський науково-дослідний інститут авіаційних матеріалів; - 2-е вид., зі змін. і доп. - ВІ-АМ, 2016; - 480 с.
31. Голофаєв О.М. Технологія ливарної форми / О.М. Голофаєв, В.І. Лагута, Г.В. Хінчаков - Луганськ: Видавництво СНУ, 2001. - 264 с.
32. Пономаренко О.І. Оптимізація технологічних рішень для цехів ливарного виробництва: Монографія / О.І. Пономаренко. - Харків: НТУ "ХП", - 2007. - 320 с.
33. Пономаренко О., Євтушенко Н., Гримзин І., Мариненко Д., Берлізева Т. Технологічний процес отримання піщано-пластмасових форм для складних тонкостінних алюмінієвих виливків. Передові виробничі процеси. *InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham. - 2020. - P. 405-414
34. Садоха М.А. Підвищення ефективності виробництва виливків в умовах дрібносерійного та одиничного виробництва. / М.О. Садоха, С.П. Ровін // *Лиття і металургія.* - 2020. - №3. - С. 10-14.
35. Пономаренко О., Євтушенко Н., Гримзин І., Лисенко Т., Мариненко Д. Передові технології виготовлення легкознімних стрижнів для отримання високоякісних відливок/ Пономаренко О., Євтушенко Н., Гримзин І., Лисенко Т.,

Мариненко Д. / Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. - 2021. - . pp 565-574

36. Єрмоленко О.О. До питань енергозбереження при виробництві виливків за екологічно безпечним процесом. /А.О. Єрмоленко, С.С. Ткаченко, Л.Г. Знаменський // Ливарне виробництво. - 2022. - №1. - С. 10-12.

37. Болдін О.М. Інженерна екологія ливарного виробництва. /А.М. Болдін, Я.І. Яковлев, С.Д. Тепляков - М.: Машинобудування. - 2010. -348 с.

38. Патент на корисну модель UA № 23593 Україна. Спосіб отримання сумішей холодного тверднення. Авторів Каратеєв А.М., Пономаренко О.І., Євтушенко Н.С. та ін. Заявка від 10.04.2007. Опубл. 25.05.2007. Бюл. № 7, 2007 р.

39. Ісагулов А.З. Дослідження міцності сумішей холодного тверднення. /А.З. Ісагулов, М.К. Ібатов, В.Ю. Куликов, С.С. Квон, А.А. Аліна // Ливарне виробництво. - 2021. - №5. - С. 12-15.

40. Про несприятливий вплив полімерних матеріалів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://te.dsp.gov.ua/fahivets-upravlinnya-derzhpratsi-pro-nespryyatlyvyj-vplyv-polimernih-materialiv/>

41. Охорона праці (Законодавство. Організація роботи): Навч. посіб. / За заг. ред. к.т.н., доц. І. П. Пістуна. – Львів: “Тріада плюс”, 2010.

42. Ткачук К.Н., Филипчук В.Л., Каштанов С.Ф., Зацарний В.В., Полукаров О.І. та ін. Виробнича санітарія: Навчальний посібник. – Рівне: 2012.

43. Наказ № 1409 від 12.12.2012 р. «Про затвердження Правил охорони праці під час роботи з полімерними композитними матеріалами».

44. Геврик. Є.О. Гігієна праці на виробництві: навч. посіб. для студентів вищих навч. Закладів / Є.О. Геврик, Н.П. Пешко. – К. : Ельга Ніка Центр, 2014. – 276 с.