

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.74.04:620.9:519.876:658.51

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-12>

ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ШЛЯХОМ ПЕРЕХОДУ НА ХОЛОДНОТВЕРДІЮЧІ СУМІШІ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ТА РЕГРЕСІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ

Бушуй Наталя Миколаївна,

магістрантка кафедри металургії та інноваційних технологій
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0009-0000-3827-8110

Кухар Володимир Валентинович,

доктор технічних наук, професор,
проректор з науково-дослідної роботи,
професор кафедри металургії та інноваційних технологій
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

У статті досліджено перехід ливарного цеху з традиційних піщано-глинистих сумішей (ПГС) на холоднотвердіючі системи (ХТС) на основі фуранових смол у межах проєкту модернізації виробництва. Метою роботи є наукове та техніко-екологічне обґрунтування доцільності такого переходу з урахуванням енергоефективності, міцності форм і екологічних обмежень. У дослідженні використано методи лабораторних випробувань і кореляційно-регресійного аналізу для оцінки впливу технологічних параметрів на властивості сумішей. Встановлено, що традиційна технологія ПГС характеризується критичною енергоемністю: для досягнення залишкової вологості 0–0,02 % необхідне термічне сушіння при температурі 350–400 °C протягом 600–670 хв, причому підвищення температури не забезпечує статистично значущого прискорення процесу. На відміну від цього, у ХТС процес твердіння відбувається за температури навколишнього середовища без використання природного газу, що змінює енергетичний баланс виробництва. Показано, що досягнення міцності форм на рівні 3,0–5,0 МПа забезпечується дозуванням смоли в межах 0,8–1,2%, тоді як збільшення частки каталізатора не впливає на міцність і є технологічно необґрунтованим. Також підтверджено можливість використання до 50 % регенованого піску без зниження міцності. Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні переходу до енергонезалежного ливарного виробництва за рахунок повного усунення стадії сушіння (відмови від газових сушильних печей) та зниження енерговитрат, за умови забезпечення екологічної безпеки шляхом впровадження систем локальної аспірації.

Ключові слова: ливарне виробництво, холоднотвердіючі суміші, фуранова смола, енергоефективність, No-Bake, регресійний аналіз, міцність форм, регенерація піску, екологічна безпека.

Bushui Nataliia, Kukhar Volodymyr. Justification of the project for modernization of foundry production by transition to cold-hardening mixtures based on energy intensity analysis and regression modeling of the moulding process

The paper investigates the transition of a foundry shop from traditional green sand (clay-bonded) mixtures to cold-hardening systems (No-Bake) based on furan resins within the framework of production modernization. The aim of the study is to provide scientific and techno-ecological justification for such a transition, taking into account energy efficiency, mould strength, and environmental constraints. The study applies laboratory testing methods and correlation-regression analysis to evaluate the influence of technological parameters on the properties of moulding mixtures. It is established that the traditional green sand technology is characterized by critical energy intensity: to achieve a residual moisture content of 0–0.02%, thermal drying at 350–400 °C for 600–670 minutes is required, while increasing temperature does not provide a statistically significant acceleration of the process. In contrast, in cold-hardening systems the hardening process occurs at ambient temperature without the use of natural gas, which fundamentally changes the energy balance of production. It is shown that achieving mould strength at the level of 3.0–5.0 MPa is ensured by controlling the resin content within 0.8–1.2%, whereas increasing the catalyst proportion does not affect strength and is technologically unjustified. The possibility of using up to 50 % reclaimed sand without reducing mould strength is also confirmed. The practical significance of the study lies in substantiating the transition to energy-independent foundry production by completely eliminating the drying stage (abandoning gas-fired drying furnaces) and reducing energy consumption, provided that environmental safety is ensured through the implementation of local exhaust ventilation systems.

Key words: foundry production, cold-hardening mixtures, furan resin, energy efficiency, No-Bake, regression analysis, mould strength, sand reclamation, environmental safety

Вступ. У машинобудівних ливарних цехах та ремонтних цехах металургійних підприємств на етапі виготовлення литих заготовок піщані технології формоутворення залишаються домінуючими для виготовлення ливарних форм і стрижнів. За даними досліджень D. A. Mhamane, понад 70 % усіх виливків виготовляють із використанням піщаних форм [1]. Проте технологія формування піщано-глинистих сумішей (ПГС) має обмеження з точки зору енергоефективності. Зростаючі вимоги до розмірної точності литва та глобальний тренд на зниження енергоємності виробництва зумовлюють поступову відмову від традиційних методів формоутворення на користь сучасних технологій хімічного твердіння (No-Bake).

На ТОВ «Метінвест Машинері», філіал №1, експлуатуються піщано-глинисті суміші з вмістом глини 9,0–12,0%. Глиниста складова зумовлює поглинання вологи на рівні 4,0–8,0%, що, у свою чергу, потребує її інтенсивного видалення шляхом термічного сушіння. У результаті технологічний цикл стає критично залежним від використання газових сушильних установок, які забезпечують видалення вологи та формування початкової міцності форм. Термічна обробка супроводжується значними витратами природного газу, тоді як досягнута міцність на стиск залишається низькою – на рівні 0,5–0,8 кг/см². Така міцність є недостатньою для забезпечення стійкості форм до гідродинамічного впливу розплаву, що призводить до їх руйнування під час заливки. Як наслідок, зростає рівень браку литва та знижується конкурентоспроможність виробництва. Висока енергоємність процесу та його залежність від природного газу не відповідають сучасним вимогам до ефективності та модернізації ливарного виробництва.

Перехід від ПГС до синтетичних зв'язувальних є стратегічним напрямом розвитку ливарного виробництва. Як зазначають у своїх працях Р. В. Лютий та співавтори [2], серед розмаїття органічних систем для відповідального сталевого та чавунного литва пріоритетним є використання фуранових смол, проте головною умовою їх безпечного використання є суворий контроль хімічного складу: вміст вільного азоту в полімері має бути суворо < 0,5%, для запобігання утворенню азотної пористості у металі. Також впровадження фуранових No-Bake систем вимагає прецизійного контролю кінетики твердіння. У фундаментальному дослідженні S. G. Acharya та співавторів [3] за допомогою статистичного методу дисперсійного аналізу (ANOVA) було кількісно доведено ієрархію впливу технологічних параметрів на

механічну стабільність форми. Температура піску (42 % впливу): Оптимальне вікно – 24–30 °С. Відхилення нижче 22 °С розцінюється як втрата контролю над процесом. Вміст смоли (35 % впливу). Решта 23 % розподіляється між часткою кислотного каталізатора (який впливає переважно на швидкість твердіння, а не на фінальну міцність) та статистичною похибкою. Оптимальна міцність, необхідна для запобігання дефекту «піщана раковина», формується на 4-й годині після замішування [3]. Що стосується газопроникності, то у ХТС цей показник сягає 150 од., завдяки цьому всі гази легко виходять крізь пори піщаної форми назовні, не потрапляючи в метал, що гарантує відсутність у литві газових раковин.

Проте існуюча наукова база має сліпі зони. S. G. Acharya тестував у лабораторії з ідеальним піском і дуже малою кількістю смоли (0,7–0,85%) [3]. Але на реальному заводі це не працює. Морфологія наповнювача диктує інші закони. Досягнення цільової газопроникності 150 од. вимагає підвищення концентрації зв'язувального до 0,8–1,2%. Відхилення можуть залишати зерна піску непокритими або формує надлишок смоли. Згідно з дослідженнями St. M. Dobosz [4], перевищення концентрації зв'язувального понад 1,2 % призводить до закупорки міжзернового простору піщаної матриці. Це не лише блокує вихід газів (знижує газопроникність), а й, за даними M. Holtzer [5], критично підвищує газотворну здатність суміші, що є головною причиною утворення газових раковин у литві.

Проблема полягає в тому, що сліпе копіювання технології часто ігнорує кислотоємність піску (показник Acid Demand Value, ADV). Він показує кількість лужних домішок (карбонатів) у кварці. Для фуранової ХТС це критичний параметр: оскільки смола твердіє від кислотного каталізатора, пісок із високим ADV просто нейтралізує цю кислоту. Наповнювач з ADV > 6 мл миттєво нейтралізує сульфокислотний каталізатор. Суміш не твердіє. Спроба технологів компенсувати це надлишковим каталізатором (понад 50 % від маси смоли) провокує масове виділення діоксиду сірки (SO₂) та катастрофічну крихкість форми. Прецизійне хімічне дозування – єдиний інструмент стабілізації процесу. Це доводить, що не можна «лікувати» поганий пісок зайвою хімією. Єдиний шлях – це надточне дозування, де враховується кожен грам смоли та кожен мілілітр каталізатора залежно від якості піску.

Разом з цим, впровадження ХТС генерує нові екологічні виклики. Згідно з аналітикою

M. Holtzer [5], замкнений цикл використання піску (регенерація 85–92 %) призводить до системного закиснення матриці. Показник рН фільтратів знижується до 3,1, що інтенсифікує вимивання важких металів (Cr, Cu, Ni). Більш того, термічна деструкція полімеру (при 1300–1500 °C) під час заливки металу в форму з регенератором провокує триразове зростання емісії канцерогенного бензолу порівняно зі свіжим піском [4]. Загальнообмінна вентиляція просто розсіює токсини по всій робочій зоні, отруюючи персонал. Парадигма «міцність ціною екології» є тупиковою. Рішення вимагає інженерної реакції. Підприємство зобов'язано змонтувати локальну аспірацію прямої дії безпосередньо над змішувачами. Витяжка має жорстко синхронізуватися з 10-секундним циклом замісу, перехоплюючи пари формальдегіду та фурфуролового спирту в першу секунду емісії. Лабораторні дослідження St. M. Dobosz вказують на майбутню перспективу використання біорозкладних полімерів, типу PCL (Polycaprolactone). St. M. Dobosz пропонує вводити PCL як екомодифікатор до складу ХТС. Часткова заміна фуранової смоли на 10 % полікапролактону дозволяє суттєво знизити емісію канцерогенних газів групи BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes), зокрема бензолу, під час заливки металу, оскільки PCL при термічній деструкції розпадається на безпечні CO₂ та воду, при цьому критично не знижуючи міцність форми [4], проте сьогодні базовим інструментом екологічної безпеки залишається потужна просторова фільтрація. Синергія жорстких хімічних пропорцій та потужної локальної аспірації гарантує повну енергонезалежність цеху [6].

Поглиблений аналіз показує, що формування дефектів у литві при використанні фуранових холоднотвердіючих сумішей має не лінійний, а багатфакторний характер, де ключову роль відіграє взаємодія між складом зв'язувального, структурою піщаної матриці та умовами термічної деструкції. Як узагальнює J. Campbell [7], газові дефекти виливків є наслідком не стільки абсолютної кількості газу, скільки порушення балансу між швидкістю його утворення та можливістю евакуації через порову структуру форми, що безпосередньо пов'язано з морфологією піску та властивостями зв'язувального. Параметри суміші слід розглядати у взаємозв'язку, а не ізольовано.

Як показано у роботах S. G. Acharya та співавторів [8, 9], властивості фуранових холоднотвердіючих сумішей і процеси газоутворення визначаються сукупною дією взаємопов'язаних факторів, зокрема вмісту зв'язувального,

каталізатора, гранулометричного складу наповнювача та умов твердіння, причому їх вплив має нелінійний характер. Встановлено, що інтенсивність газовиділення та склад газової фази залежать як від кількості смоли, так і від умов її термічної деструкції, що безпосередньо впливає на ймовірність утворення газових дефектів у литві [9]. Водночас результати моделювання, отримані G. R. Chate та ін. [10], підтверджують, що досягнення оптимальних властивостей формувальних сумішей можливе лише за умови застосування методів планування експерименту (Design of Experiments, DOE) та регресійного аналізу, які дозволяють врахувати міжфакторні взаємодії. Таким чином, сучасні підходи орієнтовані на розгляд холоднотвердіючих сумішей як керованої багатфакторної системи, що підлягає цілеспрямованій оптимізації, а не емпіричному підбору складу.

Сучасні дослідження показують, що ефективність застосування холоднотвердіючих сумішей на основі фуранових смол визначається складною нелінійною взаємодією технологічних, фізико-хімічних та екологічних факторів. Ключову роль відіграють не лише параметри складу (вміст зв'язувального та каталізатора), а й властивості піску, зокрема його кислотемність, морфологія та ступінь регенерації, а також кінетика твердіння і газоутворення. При цьому традиційний підхід, заснований на емпіричному підборі складу, не забезпечує необхідної стабільності процесу в промислових умовах. У зв'язку з цим перехід від піщано-глинистих сумішей до ХТС доцільно розглядати як формування керованої багатфакторної технологічної системи, що потребує інтегрованого підходу до оптимізації параметрів, використання методів статистичного аналізу та забезпечення екологічної безпеки виробництва.

Метою роботи є обґрунтування доцільності переходу ливарної дільниці на фуранові холоднотвердіючі суміші на основі аналізу енергоефективності та екологічних обмежень процесу. Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом застосування лабораторних досліджень, планування експерименту та регресійного аналізу для встановлення кількісних закономірностей впливу складу сумішей і технологічних параметрів формування на їх властивості.

Об'єктом дослідження є процес формоутворення ливарних форм із використанням піщано-глинистих і холоднотвердіючих сумішей.

Предметом дослідження є закономірності впливу складу сумішей (вміст зв'язувального, каталізатора, характеристики піску) та

Таблиця 1

Технічні характеристики копра лабораторного 2M030

Копер лабораторний 2M030	
Призначення: Виготовлення стандартних зразків із заданою щільністю	
Параметр	Значення
Основні вузли	Станина (1), напрямний шток (2), ударний вантаж/бойок (3), механізм підйому (4), гільза для формування зразка (5)
Привід	Механічний, кулачковий
Тип зразка	Циліндричний Ø50×50 мм
Формування зразка	У гільзі
Кількість ударів	3
Маса бойка	~7 кг
Висота падіння	~50 мм
Повторюваність	За рахунок сталої енергії удару

Таблиця 2

Технічні характеристики приладу для визначення газопроникності (модель 042)

Прилад для визначення газопроникності 042	
Призначення: Вимірювання здатності сирової форми пропускати повітря/гази	
Параметр	Значення
Основні вузли	корпус (1), шкала манометра (2), бокова шкала (3), камера зразка (4), кран повітря (5), форма (6)
Метод вимірювання	Пропуск повітря через зразок
Тип манометра	Водяний
Джерело тиску	Вага колокола та вантажів
Регулювання тиску	Додавання/зняття вантажів
Режими роботи	Відкрито / закрито / випробування
Габарити	372 × 255 × 460 мм
Маса	15,4 кг

Механічні властивості формувальних сумішей, зокрема границю міцності на стиск, визначали на випробувальній машині моделі 04116A (табл. 4).

технологічних параметрів формування на енергоефективність процесу, міцність і газопроникність форм, а також рівень шкідливих викидів у ливарному виробництві.

Методи та методики дослідження. Для розв'язання поставленої проблеми та обґрунтування доцільності переходу на нову технологію було застосовано комплексний підхід, що поєднує лабораторні методи дослідження, планування експерименту та регресійний аналіз експериментальних даних.

Обладнання, прилади та методологія експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження виконували на базі сертифікованої ливарної лабораторії із застосуванням комплексу спеціалізованого обладнання, що забезпечує відтворюваність результатів та контроль основних фізико-механічних характеристик формувальних сумішей. До складу експериментального комплексу входили: лабораторний копер, прилад для визначення газопроникності, прилад для визначення вологості, випробувальна машина для визначення міцності та аналітичні ваги. Ключові параметри роботи основного обладнання наведено в табл. 1–5.

Для забезпечення однакової щільності та геометрії дослідних зразків використовували лабораторний копер моделі 2M030 (табл. 1). Ущільнення формувальної суміші здійснювали шляхом багаторазового ударного навантаження внаслідок падіння бойка з фіксованої висоти. Формування виконували в стандартній гільзі, що забезпечувало стабільність геометричних параметрів зразків. Кінематична схема копра (кулачковий механізм) гарантує сталу енергію удару, що є критичним для відтворюваності результатів ущільнення.

Газопроникність формувальних сумішей визначали на приладі моделі 042 (табл. 2), принцип дії якого базується на пропусканні повітря через зразок за фіксованого перепаду тиску. Тиск створювали вагою колокола та додатковими вантажами, а його контроль здійснювали за допомогою водяного манометра. Така схема забезпечує стабільні умови вимірювання та можливість регулювання режимів роботи.

Вологість формувальних матеріалів визначали гравіметричним методом із використанням приладу для прискореного визначення вологості моделі 062M (табл. 3). Сушіння зразків здійснювали інфрачервоним випромінюванням, при цьому тривалість процесу контролювали реле часу, а обертання столика забезпечувало рівномірний прогрів. Це забезпечує стабільні значення початкової та залишкової вологості.

Навантаження прикладали до зразка з регульованою швидкістю до моменту руйнування. Формування навантаження здійснювали пневматичним приводом, а результати вимірювань фіксували за допомогою цифрової індикації. Конструкція машини забезпечує автоматичне розвантаження після досягнення граничного значення, що виключає вплив оператора на результат.

Таблиця 3
Технічні характеристики приладу для визначення вологості 062M


Прилад для визначення вологості 062M	
Призначення: Експрес-визначення початкової вологості суміші	
Параметр	Значення
Основні вузли	верхня кришка (1), кожух нагрівального блока (2), фіксувально-регулювальний вузол (3), стіл (4), чашка для зразка (5), реле часу (6)
Метод визначення	Гравіметричний
Тип нагріву	Інфрачервоний
Потужність лампи	500 Вт
Напруга живлення	220 В
Тип реле часу	16-1 РВМ
Час сушіння	До 6 хв
Електродвигун	Двигун синхронний дискретний ДСД-2
Частота обертання	≈ 2 об/хв

Контроль маси на всіх етапах експерименту здійснювали за допомогою аналітичних ваг Axis AD500 (табл. 5), що забезпечують високу точність відважування наважок і зразків.

Таким чином, використане обладнання забезпечує: стандартизоване формування зразків; контроль вологості та структури суміші; відтворюваність умов вимірювання газопроникності; достовірне визначення механічних характеристик; мінімізацію впливу оператора на результати експерименту. Експериментальні дослідження проводили серіями з варіюванням складу суміші та режимів обробки. Для кожного режиму забезпечували однакові умови формування зразків, вимірювання властивостей та контролю параметрів, що дозволило отримати відтворювані дані, придатні для подальшого регресійного аналізу.

Таблиця 4

Технічні характеристики випробувальної машини 04116A

Випробувальній машина моделі 04116A	
Призначення: Визначення границі міцності сирого зразка на стиск	
Параметр	Значення
Основні вузли	Блок індикації (1), навантажувальний гвинтовий механізм (2), опорна площадка (3), корпус (4)
Метод випробування	Статичний стиск
Діапазон вимірювання	60–300 кПа
Зусилля	117,8–588 Н
Швидкість навантаження	2–15 кПа/с
Похибка	±2,0 %
Повторюваність	≤ 2 %
Привід	Пневматичний
Індикація	Цифрова
Напруга живлення	220 В
Частота	50 Гц
Потужність	≤ 150 ВА
Габарити	400 × 340 × 550 мм
Маса	≤ 27 кг

Таблиця 5

Технічні характеристики електронних ваг Axis AD500

Ваги електронні аналітичні, Модель Axis AD500	
Призначення: Точне зважування наважок та контроль маси зразків	
Параметр	Значення
Межі зважування	0,02–500 г
Дискретність	0,001 г
Клас точності	III (за ДСТУ EN 45501:2017)
Час стабілізації	≤ 3 с
Калібрування	Зовнішнє
Живлення	220 В

Методика планування експерименту та регресійного аналізу. Для встановлення кількісних залежностей між параметрами процесу та властивостями формувальних сумішей застосовано підхід планування експерименту

з подальшим регресійним аналізом. З урахуванням різних механізмів формування властивостей дослідження виконували окремо для ПГС та ХТС.

Для ПГС досліджували процес термічного видалення вологи. Як фактори варіювали температуру та тривалість сушіння в межах фактичних режимів роботи обладнання. Параметром відгуку приймали залишкову вологість після сушіння. Для ХТС досліджували вплив складу суміші на формування міцності. Варіювали вміст фуранової смоли, частку кислотного каталізатора та кількість регенованого піску в технологічно допустимих межах. Параметром відгуку приймали границю міцності на стиск через фіксований час після формування.

Експерименти виконували за факторними планами з можливістю оцінки впливу параметрів та їх взаємодії. Для кожної комбінації факторів забезпечували однакові умови формування та випробування зразків. Отримані експериментальні дані обробляли із застосуванням Microsoft Excel (пакет «Аналіз даних»), який використовували для побудови регресійних моделей і визначення їх коефіцієнтів. На основі результатів формували аналітичні залежності та виконували їх аналіз для встановлення впливу факторів на властивості сумішей. Це дозволило визначити раціональні області зміни параметрів для забезпечення заданих властивостей формувальних сумішей.

Методика передбачала зіставлення отриманих залежностей і впливу факторів для ПГС та ХТС, що дозволило порівняти технології з урахуванням різної природи процесів.

Результати та дискусії. Тут наведено результати технологічного аудиту формувального процесу, експериментальних досліджень і їх регресійного аналізу, що дозволяють

кількісно оцінити ефективність сушіння ПГС та обґрунтувати параметри формування фуранових ХТС.

Результати експериментальних досліджень ПГС та ХТС і їх аналіз. Для обґрунтування напрямку модернізації проведено технологічний аудит існуючого процесу на ТОВ «Метінвест Машинері». Базові фізико-механічні параметри традиційної ПГС, що експлуатується на підприємстві, наведено у першому технічному паспорті (табл. 6).

Таблиця 6

**Технічний паспорт ПГС
(формувальна та стрижнева суміші)**

Параметр	Стрижнева суміш	Формувальна суміш
Газопроникність, од.	100 – 160	80 – 120
Міцність на стиск, кг/см ² (КПа)	0,6 – 0,8	0,5 – 0,7
Вологість, %	5,0 – 8,0	4,0 – 7,0
Вміст глини, %	9,0 – 12,0	9,0 – 12,0

Як видно з табл. 6, ПГС характеризується низькою міцністю на стиск (0,5–0,8 кг/см²), що не забезпечує достатньої стійкості форми до гідродинамічних навантажень розплаву. Водночас підвищена вологість (4–8%) зумовлює необхідність застосування тривалого термічного сушіння.

Для кількісної оцінки ефективності процесу сушіння виконано Експеримент №1 із застосуванням багатофакторного регресійного аналізу. У межах дослідження проаналізовано вплив параметрів стану суміші (вологість X_1 , міцність X_2 , газопроникність X_3) та режимних факторів (температура сушіння $X_4 = 350\text{--}400$ °С, час сушіння $X_5 = 600\text{--}670$ хв) на залишкову вологість (Y_1). Фрагмент матриці вхідних даних наведено у табл. 7.

Таблиця 7

Фактори впливу на залишкову вологість ПГС, матриця планування експерименту та результати вимірювання міцності ПГС (Експеримент №1)

Вологість суміші, X_1 , %	Міцність суміші, X_2 , КПа	Газопроникність, X_3 , од.	Температура сушки, X_4 , °С	Час сушки, X_5 , хв	Кількість залишкової вологи, Y_1 , %
6,1	0,79	130	355	630	0,01
7,2	0,8	110	350	620	0,00
6,8	0,77	120	400	670	0,00
6,5	0,67	125	380	610	0,02
7,3	0,63	140	360	620	0,00
6,5	0,78	115	350	630	0,02
6,6	0,72	130	400	600	0,01
7,1	0,65	115	380	670	0,00
7,7	0,79	100	370	600	0,00
6,4	0,8	100	350	670	0,01

Отримана математична модель описується наступним рівнянням регресії ($R^2 = 0,84$):

$$Y_1 = 0,351 - 0,018 \cdot X_1 - 0,065 \cdot X_2 - 0,003 \cdot X_3 - 3,77 \cdot 10^{-5} \cdot X_4 - 0,0002 \cdot X_5. \quad (1)$$

Значення коефіцієнта детермінації свідчить про задовільну адекватність моделі в межах дослідженого діапазону. Аналіз коефіцієнтів регресії показує, що зниження залишкової вологості визначається переважно тривалістю сушіння (X_5), тоді як вплив температури (X_4) є незначним. Це узгоджується з результатами аналізу значущості факторів, згідно з якими підвищення температури в межах 350–400 °C не супроводжується статистично відчутним прискоренням процесу видалення вологи.

Досягнення рівня залишкової вологості 0–0,02% забезпечується при тривалості сушіння 600–670 хв, що відповідає 10–11 годинам безперервної роботи сушильного обладнання. Таким чином, інтенсифікація процесу за рахунок підвищення температури є неефективною, а сам процес має виражений енергоємний характер.

Як вже зазначалось вище, альтернативою традиційній ПГС є використання процесів хімічного твердіння. Проектні параметри фуранової ХТС та відповідний технологічний ефект наведено у іншому технічному паспорті (табл. 8).

Як видно з табл. 8, застосування фуранових ХТС забезпечує формування структури без стадії термічного сушіння (вологість < 0,2%), що виключає необхідність використання сушильного обладнання. При цьому досягається

суттєве підвищення міцності (3,0–5,0 МПа) при збереженні достатньої газопроникності, що сприяє підвищенню стабільності форм і зниженню дефектності виливків.

Для визначення впливу складу суміші на міцність реалізовано Експеримент №2 із застосуванням факторного планування та подальшого регресійного аналізу. Досліджувався вплив трьох параметрів: вмісту смоли ($X_1 = 0,8$ – $1,2\%$), каталізатора ($X_2 = 30$ – 50%) та частки регенерату ($X_3 = 0$ – 50%). Результати наведено у табл. 9.

Отримана математична модель описується наступним рівнянням регресії ($R^2 = 0,735$):

$$Y_2 = 1,375 + 2,5 \cdot X_1 - 1,079 \cdot 10^{-17} \cdot X_2 - 0,003 \cdot X_3. \quad (2)$$

Значення R^2 свідчить про прийнятну узгодженість моделі з експериментальними даними. Коефіцієнти рівняння вказують на визначальний вплив вмісту фуранової смоли (X_1) на міцність, для якого підтверджено статистичну значущість ($P = 0,029$), де P – р-значення, що використовується для оцінки статистичної значущості коефіцієнтів регресії і характеризує ймовірність отримання спостережуваного ефекту за відсутності реального впливу фактора. Натомість збільшення дози кислотного каталізатора з 30% до 50% не має абсолютно ніякого впливу на міцність, а тільки труїть цех діоксидами сірки. Це свідчить про недоцільність перевищення оптимального вмісту кислотного каталізатора, оскільки його збільшення не супроводжується підвищенням міцності та призводить до зайвих матеріальних витрат.

Таблиця 8

Проектний паспорт фуранової ХТС

Фізико-механічні властивості, од. вим.	Проектне значення	Технологічний ефект модернізації
Вологість, %	< 0,2	Енергонезалежність: Повна відмова від газових сушильних печей.
Газопроникність, од.	150	Якість: Безперешкодний вихід газів деструкції смоли.
Границя міцності на стиск, МПа	3,0 – 5,0	Стабільність: Ліквідація піщаних включень та деформацій.
Газотворна здатність, см ³ /г	8 – 11	Зниження ризику газової пористості у 2,5 раза.
Точність розмірів, мм	0,3 – 0,5	Можливість отримання виливків чистових розмірів.
Рівень регенерації піску, %	85 – 92	Зменшення витрат на закупівлю свіжого піску на 90%.

Таблиця 9

Матриця планування експерименту та результати вимірювання міцності ХТС (Експеримент №2)

Смола, X_1 , %	Каталізатор, X_2 , %	Регенерат, X_3 , %	Міцність через 4 год, Y_2 , МПа
0,8	30	0	3,20
1,2	30	0	4,80
0,8	50	0	3,00
1,2	50	0	4,50
0,8	30	50	3,40
1,2	30	50	3,80
0,8	50	50	3,60
1,2	50	50	4,10

Крім того, результати регресійного аналізу вказують на можливість використання у складі суміші до 50% регенованого піску без суттєвого зниження міцності, що створює передумови для зменшення витрат на виробництво (потребує додаткової експериментальної перевірки).

Порівняльний аналіз енергоємності процесів формування при використанні ПГС та ХТС. Порівняльний аналіз енергоємності процесів формування (табл. 10) демонструє принципову відмінність між традиційною технологією піщано-глинистих сумішей та холоднотвердіючими системами. Для досягнення залишкової вологості на рівні 0–0,02% у ПГС необхідне термічне сушіння при температурі 350–400 °С протягом 600–670 хв (10–11 год), що супроводжується безперервним спалюванням природного газу. При цьому підвищення температури сушіння не забезпечує суттєвого скорочення тривалості процесу, що свідчить про його низьку енергетичну ефективність.

На відміну від цього, у технології холоднотвердіючих сумішей стадія термічного сушіння повністю відсутня, оскільки формування міцності відбувається за рахунок хімічної полімеризації зв'язувального при температурі навколишнього середовища. Це дозволяє усунути найбільш енергоємну операцію процесу та скоротити тривалість формування більш ніж на 10 годин для кожної партії форм.

Нормована оцінка енерговитрат показує, що перехід на ХТС забезпечує їх зниження до рівня 0,05–0,10 від базового значення для ПГС, що відповідає скороченню загального енергоспоживання на 90–95%. При цьому в обох технологіях зберігаються енерговитрати на приготування та змішування сумішей, однак у випадку ПГС їх внесок є незначним порівняно з енерговитратами на сушіння (<10%), тоді як у технології ХТС саме змішування та дозування

компонентів формують основну частку залишкових енерговитрат.

Таким чином, перехід на холоднотвердіючі суміші забезпечує не лише скорочення тривалості виробничого циклу, але й радикальне зниження енергоємності процесу формування за рахунок повного усунення стадії термічного сушіння.

Висновки. Проведений регресійний аналіз процесу сушіння піщано-глинистих сумішей ($R^2 = 0,84$) показав, що досягнення залишкової вологості на рівні 0–0,02% забезпечується переважно тривалістю сушіння (600–670 хв), тоді як підвищення температури в межах 350–400 °С не приводить до статистично значущого прискорення процесу. Це свідчить про дифузійно обмежений характер видалення вологи та високу енергоємність технології ПГС.

Порівняльний аналіз енергоємності процесів формування показав, що використання ХТС дозволяє повністю виключити стадію термічного сушіння та скоротити тривалість технологічного циклу більш ніж на 10 годин. Нормована оцінка енерговитрат свідчить про їх зниження до рівня 0,05–0,10 від базового значення для ПГС, що відповідає скороченню енергоспоживання на 90–95%.

За результатами регресійного аналізу властивостей ХТС ($R^2 = 0,735$) встановлено, що визначальним фактором формування міцності є вміст фуранової смоли (0,8–1,2%), для якого підтверджено статистичну значущість ($P = 0,029$). У зазначеному діапазоні забезпечується досягнення міцності форм на рівні 3,0–4,8 МПа, що відповідає вимогам до стабільності форми при заливанні металу.

Вплив кислотного каталізатора в межах 30–50% від маси смоли не є статистично значущим щодо міцності, що свідчить про відсутність ефекту від його підвищених дозувань.

Таблиця 10

Порівняння енергоємності процесів формування при використанні ПГС та ХТС

Параметр	ПГС	ХТС / No-Bake
Температура основного процесу	350–400 °С	20–30 °С
Тривалість енергоємної стадії	600–670 хв (10–11 год)	відсутня
Тип процесу твердіння	термічне сушіння	хімічне твердіння
Джерело основних енерговитрат	спалювання природного газу	електроспоживання (змішування)
Основна енергоємна операція	сушіння форм	змішування та дозування компонентів
Питома роль змішування в енергобалансі	незначна (<10%)	визначальна (до 100 % залишкових витрат)
Відносний рівень енерговитрат (ПГС = 1,0)*	1,0	0,05–0,10
Оцінка зниження енерговитрат	–	на 90–95 %

Примітка: * – значення відносного рівня енерговитрат наведено у нормованих одиницях (ПГС = 1,0) на основі виключення стадії термічного сушіння як домінуючої складової енерговитрат процесу.

Перевищення оптимального вмісту каталізатора призводить до необґрунтованого зростання матеріальних витрат та підвищення рівня шкідливих викидів без покращення механічних характеристик суміші.

Введення до 50% регенованого піску не супроводжується суттєвим зниженням міцності форм у межах дослідженого діапазону параметрів, що створює передумови для зменшення витрат на сировину. Водночас використання регенерату пов'язане з екологічними

обмеженнями, зокрема закисленням піщаної матриці та зростанням емісії токсичних продуктів термічної деструкції, що потребує врахування при впровадженні технології.

Сукупність отриманих результатів підтверджує доцільність переходу від ПГС до фуранових холоднотвердіючих сумішей як до керованої багатофакторної технологічної системи, оптимізація якої повинна базуватися на поєднанні регресійного аналізу, контролю складу суміші та забезпечення екологічної безпеки виробництва.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Mhamane D. A., Rayjadhav S. B., Shinde V. D. Analysis of chemically bonded sand used for molding in foundry. *Asian Journal of Science and Applied Technology*. 2018. Vol. 7, No. 1. P. 11–16. DOI: <https://doi.org/10.51983/ajsat-2018.7.1.1025>
2. Лютий Р. В., Селівьорстов В. Ю., Іванов В. Г., Ямшинський М. М. Зв'язувальні матеріали для ливарних форм і стрижнів: проблеми і перспективи. *Метал та лиття України*. 2022. Т. 30, № 2 (329). С. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>
3. Sheladiya M. V., Acharya S. G., Pandya J. G., Acharya G. D. Sensitivity analysis of furan-no-bake sand mold system parameters. *The IUP Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. XII, No. 4. P. 22–29. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3796050>
4. Dobosz St. M., Major-Gabryś K., Grabarczyk A. New materials in the production of moulding and core sands. *Archives of Foundry Engineering*. 2015. Vol. 15, Issue 4. P. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.1515/afe-2015-0073>
5. Holtzer M., Dańko R., Kmita A. Influence of a reclaimed sand addition to moulding sand with furan resin on its impact on the environment. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2016. Vol. 227. Article 16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2707-9>
6. Бушуй Н. М., Пашинський В. В. Перспективи впровадження Cold-Vox та ХТС-процесів при модернізації ливарного виробництва. *Start in Science: студентська науково-технічна конференція: збірник тез і анотацій наукових доповідей*. Одеса: Олді+, 2025. С. 40–41.
7. Campbell J. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. 978 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01548-1>
8. Acharya S. G., Vadher J. A., Sheladiya M. A Furan No-Bake Binder System Analysis for Improved Casting Quality. *International Journal of Metalcasting*. 2016. Vol. 10, No. 4. P. 491–499. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0059-x>
9. Acharya S. G., Vadher J. A., Kanjariya P. V. Identification and Quantification of Gases Releasing From Furan No Bake Binder. *Archives of Foundry Engineering*. 2016. Vol. 16, No. 3. P. 5–10. DOI: <https://doi.org/10.1515/afe-2016-0039>
10. Chate G. R., Patel G. C. M., Deshpande A. S., Parappagoudar M. B. Modeling and optimization of furan molding sand system using design of experiments and particle swarm optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 232, No. 5. P. 579–598. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954408917728636>

REFERENCES:

1. Mhamane, D. A., Rayjadhav, S. B., & Shinde, V. D. (2018). Analysis of chemically bonded sand used for molding in foundry. *Asian Journal of Science and Applied Technology*, 7(1), 11–16. <https://doi.org/10.51983/ajsat-2018.7.1.1025>
2. Liutyi, R. V., Seliviorstov, V. Yu., Ivanov, V. H., & Yamshynskiy, M. M. (2022). Zv'язuvalni materialy dlia lyvarnykh form i stryzhniv: problemy i perspektyvy [Binding materials for foundry molds and cores: problems and prospects]. *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, 30(2), 72–82. <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005> [in Ukrainian]
3. Sheladiya, M. V., Acharya, S. G., Pandya, J. G., & Acharya, G. D. (2019). Sensitivity analysis of furan-no-bake sand mold system parameters. *The IUP Journal of Mechanical Engineering*, 12(4), 22–29. <https://ssrn.com/abstract=3796050>
4. Dobosz, S. M., Major-Gabryś, K., & Grabarczyk, A. (2015). New materials in the production of moulding and core sands. *Archives of Foundry Engineering*, 15(4), 25–28. <https://doi.org/10.1515/afe-2015-0073>

5. Holtzer, M., Dańko, R., & Kmita, A. (2016). Influence of a reclaimed sand addition to moulding sand with furan resin on its impact on the environment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227, Article 16. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2707-9>

6. Bushui, N. M., & Pashynskiy, V. V. (2025). Perspektyvy vprovadzhennia Cold-Box ta KhTS-protseviv pry modernizatsii lyvarnoho vyrobnytstva [Prospects for implementation of Cold-Box and HTS processes in foundry modernization]. *Start in Science: Student Scientific and Technical Conference Proceedings*, 40–41. [in Ukrainian]

7. Campbell, J. (2015). *Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01548-1>

8. Acharya, S. G., Vadher, J. A., & Sheladiya, M. (2016). A furan no-bake binder system analysis for improved casting quality. *International Journal of Metalcasting*, 10(4), 491–499. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0059-x>

9. Acharya, S. G., Vadher, J. A., & Kanjariya, P. V. (2016). Identification and quantification of gases releasing from furan no-bake binder. *Archives of Foundry Engineering*, 16(3), 5–10. <https://doi.org/10.1515/afe-2016-0039>

10. Chate, G. R., Patel, G. C. M., Deshpande, A. S., & Parappagoudar, M. B. (2018). Modeling and optimization of furan molding sand system using design of experiments and particle swarm optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 232(5), 579–598. <https://doi.org/10.1177/0954408917728636>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026