

Федоров М. М.
Лютин Р. В.
Дьяченко Ю. Г.
Кочешков А. С.
Люта Д. В.

ФОСФАТНІ ЗВ'ЯЗУВАЛЬНІ КОМПОНЕНТИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ФОРМ І СТРИЖНІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК ШТАМПОВОГО ІНСТРУМЕНТУ

Ливарні технології виготовлення деталей штампового інструменту мають відчутні переваги перед використанням поковок, сортового прокату або порошкових деталей. Сталі, які використовують для штампових вставок, матриць, пуансонів тощо, в цілому мають задовільні ливарні властивості і дають змогу отримувати точні литі заготовки. Однак вибір способу лиття на сьогодні залишається актуальним питанням, оскільки технології виготовлення литих штампів дорогі, енергоємні матеріалоємні. Виробництво таких деталей дрібносерійне, в той час як провідні ливарні технології розраховані на більшій серії або на масове виробництво. Важливим завданням є створення технологічних умов виготовлення заготовок із легованих сталей з використанням мінімальної кількості матеріалів, які, в свою чергу, є доступними та дешевими. Порівняно із спеціальними способами лиття, які використовують зараз, лиття у разові форми дає змогу вирішити це завдання. Однак постає нове питання – створення ефективних формувальних матеріалів, придатних для цієї технології та орієнтованих на умови дрібносерійного виробництва, тобто якісних і простих у використанні стрижневих сумішей. У статті представлено результати дослідження процесів утворення зв'язувальних компонентів у системах ортофосфорної кислоти з сульфатами металів $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $MnSO_4 \cdot 5H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ та $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$. Експериментально встановлено, що усі вказані сульфати під час нагрівання в інтервалі від 150 °C до 300 °C вступають у хімічну взаємодію з ортофосфорною кислотою, в результаті чого відбувається твердіння сумішей на їхній основі. Найкращі показники як зв'язувальні компоненти для стрижневих сумішей мають системи із сульфатами заліза та алюмінію. Для них встановлено оптимальне співвідношення сульфату та кислоти, температуру нагрівання та необхідний вміст зв'язувального компонента в суміші. Досліджено різні способи приготування сумішей і встановлено доцільність попереднього змішування сульфатів металів з ортофосфорною кислотою з отриманням розчину або сухої композиції. Лабораторні випробування полягали у застосуванні сумішей в процесах лиття високолегованої хромоалюмінієвої сталі. Виливки не мають пригару та інших поверхневих дефектів, отже створені стрижневі суміші потенційно придатні для лиття легованих, в тому числі штампових сталей.

Ключові слова: штамповий інструмент, вилівок, енергія Гіббса, зв'язувальний компонент, легована сталь, ортофосфорна кислота, міцність при стисканні, стрижнева суміш, сульфати металів.

Процеси виготовлення металевих виробів мають забезпечувати належну якість продукції, фізико-механічні, технологічні та спеціальні властивості сплаву, серійність виробництва, складність конфігурації виробів тощо. При цьому вимогою до будь-якого технологічного процесу завжди залишаються ресурсозбереження, енергоефективність, екологічність [1].

Виготовлення деталей штампового інструменту вирізняється особливою відповідальністю, підвищеними вимогами до точності та стійкості таких деталей, якості поверхні. Тому вибір технологічних процесів їх виготовлення досить обмежений. Незважаючи, що методи холодної або гарячої деформації металів тиском, порошкова металургія, а також адитивні технології здатні забезпечити високий рівень механічних властивостей металу, на відміну від способів лиття [2, 3], все ж лиття залишає за собою більшу універсальність щодо розмірів, конфігурації заготовок, а також широкого спектру можливих сплавів [4].

Значне поширення серед штампового інструменту мають сталі з середнім вмістом хрому 9Х5ВФ, Х6ВФ або підвищеним вмістом хрому Х12Ф1 і Х12М [5]. Такі матеріали цілком придатні для ливарної технології, тому процеси виготовлення литих штампів мають тенденцію до більшого поширення [6].

Виготовлення штампового оснащення методом лиття може здійснюватися у разові піщані форми або одним із спеціальних способів лиття. Переважно використовують лиття в керамічні форми за постійними моделями, що значною мірою підвищує вартість виготовлення

оснащення [7]. Отримання штампових заготовок у металевих формах пов'язано із ще більшою вартістю виготовлення цих форм та їх низькою стійкістю.

Використання разових ливарних форм із незадовільними технологічними властивостями погіршує якість штампових заготовок і часто призводить до різних видів браку. В свою чергу, властивості ливарної форми, а як наслідок, формування якісної литої деталі в ній, визначаються поєднанням двох основних компонентів – наповнювача і зв'язувального матеріалу [8]. Серед наповнювачів для лиття високолегованих спеціальних сталей переважають хроміт, хромомагnezит, олівін, алюмосилікатні вогнетриви. Тобто питання забезпечення хімічної інертності та термічної стійкості за рахунок заміни кварцового піску на інший матеріал в принципі вирішено [8].

Щодо зв'язувальних компонентів, то їх вибір для лиття спеціальних сталей являє собою досить складне завдання: необхідного поєднання властивостей на сьогодні не досягнуто. Більшість технологічних процесів побудовано на органічних зв'язувальних компонентах, які не можуть вважатися вдалим вибором для технологій лиття штампових заготовок. Отже, науковим і технічним питанням є пошук неорганічних матеріалів з належним комплексом функціональних властивостей.

На сьогодні відомо ряд дослідницьких робіт із удосконалення технології лиття у сирі піщано-бентонітові форми [9, 10], розроблення процесу синтезу і використання у складі стрижневих сумішей нового органічного зв'язувального компонента [11, 12]. Також науковці працюють над впровадженням нових процесів зміцнення сумішей з рідким склом [13]; відновився інтерес до металофосфатних стрижневих сумішей.

В усіх наведених роботах виготовлення ливарних стрижнів передбачається в умовах серійного або масового виробництва, у той час як виготовлення штампового інструменту в основному носить індивідуальний або дрібносерійний характер виробництва. Тому для розвитку цього сегменту необхідним є пошук технологій, адаптованих до вітчизняних ливарних цехів, базованих на використанні доступних і недефіцитних матеріалів, з мінімальними капіталоукладеннями. До таких процесів відноситься виготовлення стрижнів із сумішей, які тверднуть при нагріванні – в умовах теплового сушіння або гарячого оснащення [8, 14].

Дослідженнями кафедри ливарного виробництва КПІ імені Ігоря Сікорського вперше в технології виготовлення ливарних стрижнів отримано новий клас фосфатних зв'язувальних компонентів безпосередньо для реалізації такої технології. Досліджено температурні і часові умови отримання фосфатів кремнію та цирконію в системах $\text{H}_3\text{PO}_4 - \text{SiO}_2$ та $\text{H}_3\text{PO}_4 - \text{ZrSiO}_4$ в процесі нагрівання сумішей [15, 16]. Також отримано нові зв'язувальні компоненти в процесі нагрівання ортофосфорної кислоти спільно з алюмовмісними матеріалами різної хімічної природи [17]. Таким чином, процеси синтезу фосфатних зв'язувальних компонентів вже поширено на матеріали, які раніше для цього не використовували. Крім того, властивості сумішей відповідають процесам виготовлення штампових литих заготовок [18].

Наступним кроком є дослідження процесів взаємодії ортофосфорної кислоти з неорганічними солями металів з метою розширення ресурсної бази створення фосфатних зв'язувальних компонентів. Однією з найбільших груп неорганічних солей є сульфати. Однак відомо, що сульфатна кислота є сильнішою за ортофосфору, тому взаємодія останньої з сульфатами неможлива. При цьому слід зазначити, що неможливість взаємодії відноситься до нормальних умов та звичайної (безводної) форми сульфатів. Зміна цих параметрів може призвести до появи можливості подібної взаємодії, але такі дослідження не проводили.

Метою роботи є дослідження умов хімічної взаємодії ортофосфорної кислоти з сульфатами металів з метою отримання фосфатних зв'язувальних компонентів, придатних для виготовлення ливарних стрижнів.

У роботі було досліджено суміші з неорганічними зв'язувальними системами, які складаються із солей металів $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ та ортофосфорної кислоти. Попередньо відомо, що сульфати мають зв'язувальну здатність [8, 14, 19], і це було підтверджено в процесі першого експерименту.

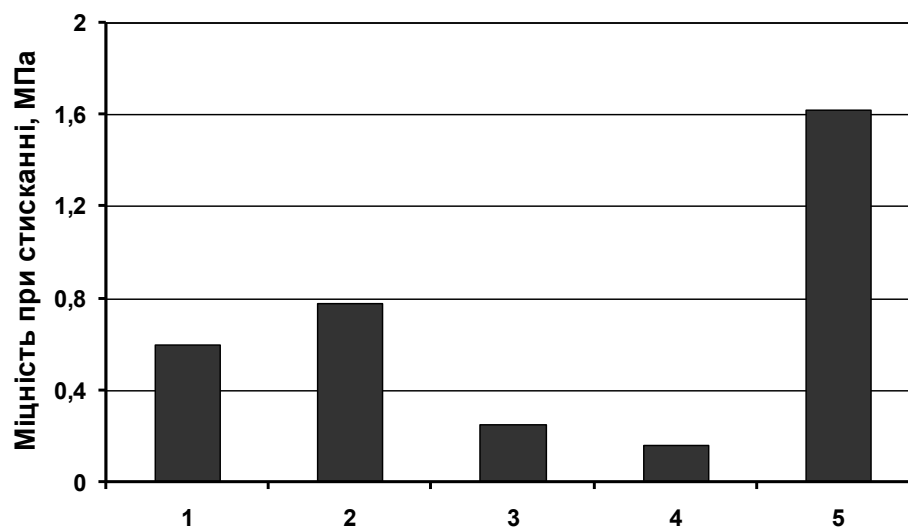
Для проведення дослідження були виготовлені стандартні циліндричні зразки із сумішей, склад яких наведено в табл. 1. Зміцнення проводили протягом 1 год за температури 200 °С. Міцність при стисканні вимірювали на універсальній установці моделі УС-700.

Таблиця 1

Склад сумішей із сульфатами металів

Компоненти сумішей				
1	2	3	4	5
MgSO ₄ ·7H ₂ O 3,0 %	MnSO ₄ ·5H ₂ O 3,0 %	FeSO ₄ ·7H ₂ O 3,0 %	CoSO ₄ ·7H ₂ O 3,0 %	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O 3,0 %
Вода – 2,0 %				
Пісок кварцовий 3K ₅ O ₃ O ₂₅ – решта				

Результати визначення міцності зразків показано на рис. 1.



1 – зразки з MgSO₄·7H₂O; 2 – зразки з MnSO₄·5H₂O; 3 – зразки з FeSO₄·7H₂O;
4 – зразки з CoSO₄·7H₂O; 5 – зразки з Al₂(SO₄)₃·18H₂O

Рис. 1. Міцність зразків з сульфатами металів без ортофосфорної кислоти

З отриманих результатів видно, що сульфати металів після теплового сушіння забезпечують міцність, хоча і незначну. Це свідчить про те, що сульфати дійсно мають зв'язувальні властивості. Однак відомо, що використання сульфатів у складі формувальних або стрижневих сумішей призводить до підвищеного пригару [8, 14], що особливо актуально для виливків із легованих сталей [4]. Отже, потрібно мінімізувати вміст сульфатів у суміші за рахунок перетворення їх на інші, більш корисні і, можливо, більш міцні сполуки.

Установлено, що введення сульфатів у суміш разом з H₃PO₄ дає змогу значною мірою збільшити міцність. Цей ефект можна пов'язати із хімічною взаємодією сульфатів з кислотою та утворенням нових зв'язувальних компонентів [20].

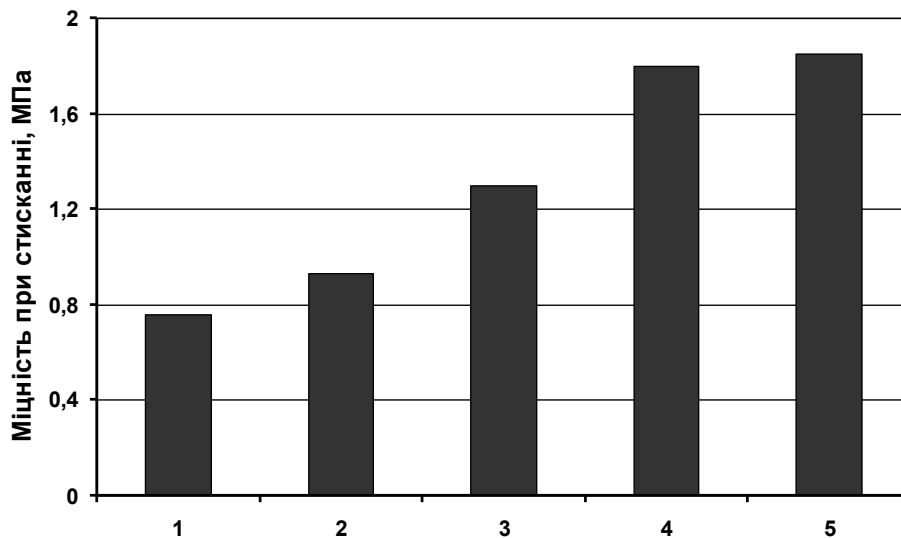
Факт підвищення міцності підтверджено наступним експериментом. Виготовлено стандартні циліндричні зразки із сумішей, склад яких зазначено в табл. 2. Зразки також зміцнювали за температури 200 °С протягом 1 год.

Таблиця 2

Склад сумішей із сульфатами металів та ортофосфорною кислотою

Компоненти сумішей				
1	2	3	4	5
MgSO ₄ ·7H ₂ O 3,0 %	MnSO ₄ ·5H ₂ O 3,0 %	FeSO ₄ ·7H ₂ O 3,0 %	CoSO ₄ ·7H ₂ O 3,0 %	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O 3,0 %
Ортофосфорна кислота – 3,0 %				
Вода – 2,0 %				
Пісок кварцовий 3K ₅ O ₃ O ₂₅ – решта				

Результати визначення міцності зразків показано на рис. 2.

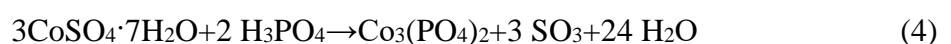
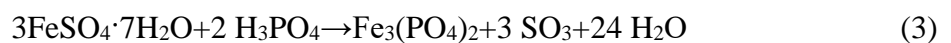
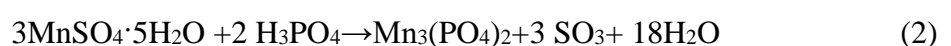
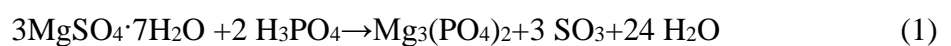


1 – зразки з MgSO₄·7H₂O; 2 – зразки з MnSO₄·5H₂O; 3 – зразки з FeSO₄·7H₂O;
4 – зразки з CoSO₄·7H₂O; 5 – зразки з Al₂(SO₄)₃·18H₂O

Рис. 2. Міцність зразків з сульфатами металів та 3,0 % ортофосфорної кислоти

Порівнюючи отримані результати, можна зробити висновок, що зв'язувальні властивості більшості сульфатів металів менші, ніж сполук, які утворюються після їх взаємодії з ортофосфорною кислотою.

В результаті вказаної взаємодії можуть утворюватися фосфати трьох типів: повнозаміщений ортофосфат (PO₄), двозаміщений кислий ортофосфат (HPO₄), однозаміщений кислий ортофосфат (H₂PO₄). З хімічної точки зору проходження реакцій між сульфатами та ортофосфорною кислотою вважається неможливим. Однак для остаточної перевірки необхідно розглянути термодинамічні передумови, зауваживши при цьому реальні температури взаємодії, а також точну хімічну природу реагентів. Для зменшення загального обсягу інформації розрахунки здійснено виключно для реакцій з утворенням повнозаміщених ортофосфатів (PO₄):



Графіки зміни вільної енергії залежно від температури потенційного проходження реакцій, наведено на рис. 3 (індекси на графіках відповідають номерам реакцій).

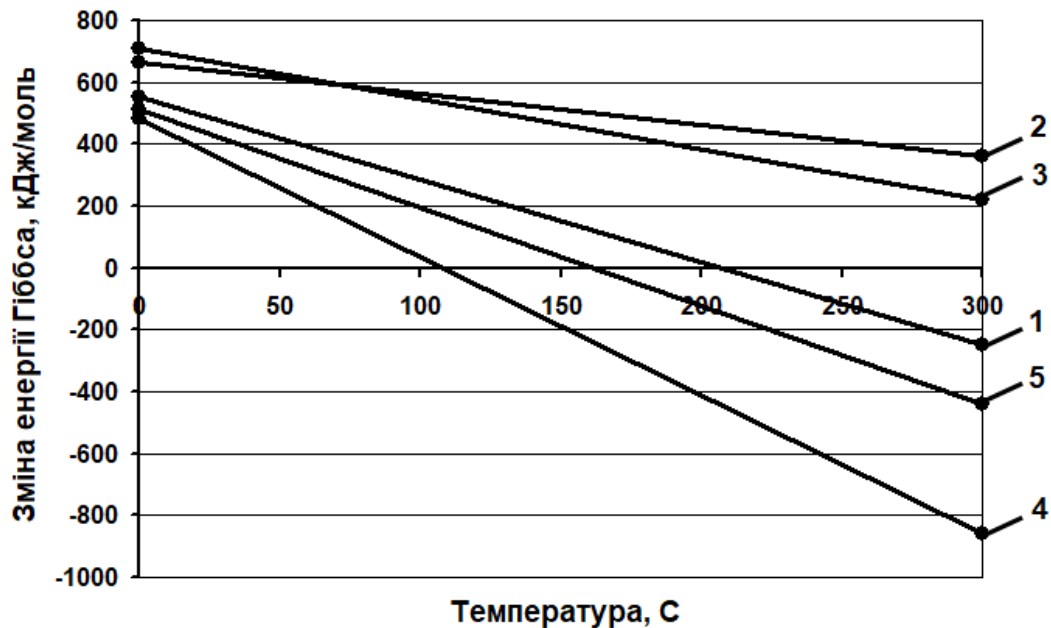


Рис. 3. Зміна енергії Гіббса для реакцій взаємодії ортофосфорної кислоти з сульфатами металів

Термодинамічний аналіз показав, що за нормальних умов дійсно всі досліджені сульфати не можуть взаємодіяти з ортофосфорною кислотою. Проте за 200 °C (температура, за якої визначено міцність зразків), а тим більше при подальшому нагріванні, ΔG знижується, і для $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ та $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ стає від'ємною. Це, у свою чергу, свідчить про можливість проходження реакцій утворення фосфатів.

Під час приготування суміші необхідно також забезпечити рівномірний розподіл компонентів (кислоти і сульфату металу) між часточками наповнювача. Тільки рівномірний розподіл забезпечує повноцінну хімічну взаємодію в подальшому під час нагрівання.

З метою більш якісного змішування основних реагентів (кислоти і сульфатів) провели порівняльні досліді, під час яких приготування сумішей здійснювали за трьома схемами:

- 1) послідовне додавання до вогнетривкого наповнювача сульфату металу, ортофосфорної кислоти та води в процесі перемішування;
- 2) додавання до вогнетривкого наповнювача попередньо змішаного розчину сульфату металу в ортофосфорній кислоті;
- 3) додавання до вогнетривкого наповнювача попередньо перемішаного, нагрітого та подрібненого сухого матеріалу, отриманого із ортофосфорної кислоти та сульфату металу, зподальшим додаванням води в процесі перемішування.

Зміцнення стандартних циліндричних зразків проводили за температур 150, 200, 250 та 300 °C. Діапазон температур дослідження розширено з огляду на отримані дані термодинамічного аналізу (див. рис. 3).

Усі суміші, які готували за схемою 1, містили по 3,0 % ортофосфорної кислоти. Кількість сульфатів змінювали для отримання співвідношень сульфату до кислоти 1 : 2, 1 : 1, 2 : 1 та 3 : 1. Тобто кількість сульфатів у сумішах була 1,5 %; 3,0 %; 6,0 % і 9,0 %.

В процесі приготування сумішей за схемою 2, для отримання розчинів, сульфати попередньо змішували з ортофосфорною кислотою та витримували 24 год за кімнатної температури. Після витримки сульфати частково або повністю розчинялись в кислоті. Концентрація сульфатів у таких розчинах від 10 до 50 %.

Для приготування зв'язувальних композицій, використаних у схемі 3, змішували сульфат металу з ортофосфорною кислотою у співвідношеннях 1 : 1, 3 : 1, 5 : 1 та 7 : 1 відповідно. Витримували в печі при температурі 200 °С протягом 1 год. Після витримки наважки діставали з печі, охолоджували на повітрі і, в разі наявності в них грудок або спечених конгломератів часточок, подрібнювали їх. Отримані композиції просіювали через сито із розміром комірки 0,2 мм, після чого використовували для приготування сумішей.

В результаті серії експериментів із приготування сумішей за усіма трьома технологічними схемами та аналізу результатів міцності отриманих зразків (для скорочення вмісту статті наведено тільки фінальні результати), було встановлено, що в усіх випадках попереднє змішування сульфатів з ортофосфорною кислотою забезпечує інтенсифікацію взаємодії між цими реагентами за рахунок більш рівномірного розподілу компонентів.

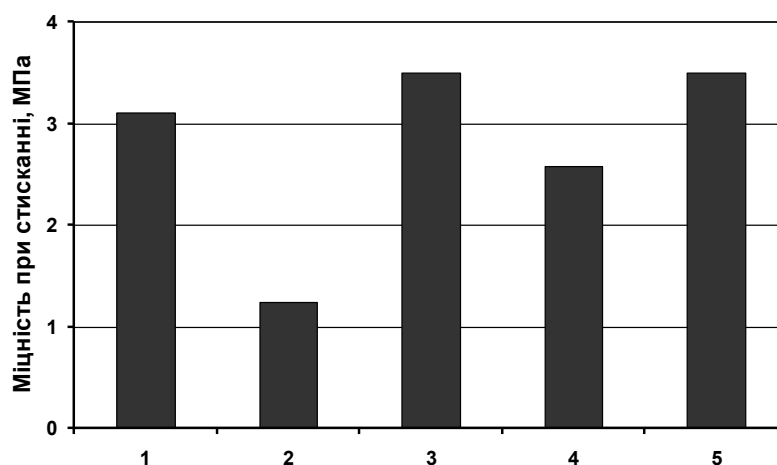
Експериментально встановлено, що для досягнення максимальної міцності зразків для кожного із сульфатів ефективними є способи утворення зв'язувального компонента з ортофосфорною кислотою, які передбачають попереднє змішування цих компонентів за нормальної температури або при нагріванні (табл. 3).

Таблиця 3

Склад розроблених сумішей

Індекс	Зв'язувальний компонент	Наповнювач	Температура зміцнення, °С
1	Розчин (30 % $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ + 70 % H_3PO_4) у кількості 6,0 %	Пісок кварцовий 3К ₅ О ₃ 025	200
2	Розчин (50 % $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ + 50 % H_3PO_4) у кількості 6,0 %	Пісок кварцовий 3К ₅ О ₃ 025	150
3	Розчин (30 % $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ + 70 % H_3PO_4) у кількості 6,0 %	Пісок кварцовий 3К ₅ О ₃ 025	200
4	Розчин (10 % $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ + 70 % H_3PO_4) у кількості 6,0 %	Пісок кварцовий 3К ₅ О ₃ 025	250
5	Композиція (5 мас. ч. $Al(SO_4)_2 \cdot 18H_2O$ + 1 мас. ч. H_3PO_4) у кількості 7,0 %	Пісок кварцовий 3К ₅ О ₃ 025	200

Показники міцності, отримані при проведенні експериментів для кожної із сумішей, наведено на рис. 4.



1 – зразки з $MgSO_4 \cdot 7H_2O$; 2 – зразки з $MnSO_4 \cdot 5H_2O$; 3 – зразки з $FeSO_4 \cdot 7H_2O$;
4 – зразки з $CoSO_4 \cdot 7H_2O$; 5 – зразки з $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$

Рис. 4. Максимальна міцність зразків сумішей з сульфатами металів та ортофосфорною кислотою

Стрижневі суміші з неорганічними солями $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ та $\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ показали найбільшу міцність (3,5 МПа). Отже, вони найбільшою мірою відповідають завданню нашої роботи. Проте міцність понад 2,0 МПа, що достатньо для стрижнів 3 і 4 класу, можливо отримати і з поєднаннями ортофосфорної кислоти з сульфатами $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ і $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Суміш з $\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ не забезпечує належного рівня міцності, а тому на цьому етапі рекомендувати її для виготовлення ливарних стрижнів неможливо.

Процеси плавлення і заливання штампових сталей складно реалізувати в лабораторних умовах, тому придатність розроблених зв'язувальних компонентів і відповідно стрижневих сумішей перевіряли на жаростійкій високолегованій сталі 30X25Ю2ТЛ, технологічний процес плавлення і лиття якої налагоджено в лабораторії кафедри ливарного виробництва КПІ імені Ігоря Сікорського. Ливарні форми для виливків на рис. 5, а, б, та ливарні стрижні для виливка на рис. 5, в, виготовляли із сумішей з сульфатами заліза та алюмінію (див. табл. 3) без використання протипригарного покриття, температура заливання 1560 ± 20 °С.



Рис. 5. Виливки, виготовлені із легованої сталі з використанням форм і стрижнів з розроблених сумішей:

а – діаметр 80 мм, товщина 15 мм; б – 180 x 120 мм; в – довжина 200 мм, внутрішній діаметр 20 мм

Високолегована сталь, використана в дослідженні, наближена до сталей, які використовують для штампового інструменту за такими параметрами як підвищена температура заливання, вміст основного легувального елемента та схильність до фізико-хімічної взаємодії з формою (утворення пригару). Тому отримані виливки з чистою поверхнею та без ливарних дефектів свідчать про потенційну можливість подальшого запровадження створених стрижневих сумішей.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що поєднання сульфатів металів із ортофосфорною кислотою у складі стрижневої суміші забезпечує зміцнення в процесі нагрівання, при чому міцність є більшою, ніж в аналогічних сумішах із сульфатами металів без ортофосфорної кислоти.

Термодинамічними розрахунками підтверджено можливість хімічної взаємодії ортофосфорної кислоти з деякими сульфатами металів, які мають кристалогідрату форму, зокрема $\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

Проведено експерименти із технології сумішоприготування, які довели ефективність попереднього змішування сульфатів металів з ортофосфорною кислотою для отримання зв'язувального розчину або сухої композиції.

Суміш із 6,0 % розчину, який складається із 30 % $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ та 70 % H_3PO_4 (концентрація 85%), має міцність при стисканні понад 3,5 МПа після теплового зміцнення за температури 200 °С.

Суміш із 7,0 % зв'язувальної композиції, яка складається із 1 мас. ч. $Al(SO_4)_2 \cdot 18H_2O$ та 1 мас. ч. H_3PO_4 , має міцність при стисканні понад 3,0 МПа після теплового зміцнення при температурі 200 °С, що є цілком достатнім для виготовлення ливарних стрижнів.

Виливки із жаростійкої високолегованої сталі 30X25Ю2ТЛ, виготовлених із використанням форм і стрижнів із розроблених сумішей, не мають ливарних дефектів та характеризуються гладкими поверхнями, що дає змогу спрогнозувати можливість використання розроблених сумішей в подальшому для лиття штампового інструменту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бартель Г.П., Федоров Н.Н., Тупчиенко В.И. Перспективная технология изготовления износостойкого литого штампового инструмента. *Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку»*. Краматорськ: ДДМА. 2004. С. 113.
2. Minitskyi A.V., Stepanov O.V., Radchuk S.V., Byba Ye.G., Loboda P.I. 3D Printing of Iron-Based Lattice Structures Produced by Selective Laser Melting. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2022. 61. 4, pp. 189–196. <https://doi.org/10.1007/s11106-022-00306-9>
3. Minitsky A. BybaYe., Minitska N., Radchuk S. A study of the structure and properties of materials based on an iron – copper composite powder. *Eastern-European Journal of enterprise technologies*. 2019. 2/12 (98). pp. 44–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164017>
4. Макаревич О.П., Федоров Г.С., Платонов Є.О. Виробництво виливків із спеціальних сталей. Київ: Видавництво НТУУ «КПІ». 2005. 712 с.
5. Хільчевський В.В., Кондратюк С.Є., Степаненко В.О., Лопатько К.Г. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: навч. посібник. Київ: Либідь. 2002. 328 с.
6. Боков В.М. Конструювання та виготовлення штампів. Проектування штампів: формозмінних, складної дії для складання та автоматичного штампування: навч. посібник. Кіровоград : Імекс-ЛТД. 2010. 321 с.
7. Специальные способы литья. Справочник. Под общ. ред. В.А. Ефимова. Москва: Машиностроение. 1991. 436 с.
8. Лютий Р.В., Гурия І.М. Формувальні матеріали: Підручник. Київ: КПІ ім. І. Сікорського. 2020. 257 с.
9. Федоров Н.Н. Методические аспекты определения свойств бентонитовых формовочных глин. *Литье и металлургия*. 2014. 4(77). С. 19–23.
10. Федоров Н.Н. Аддитивный способ изменения свойств бентонитовой формовочной глины. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2010. 3(20). С. 249–253.
11. Пономаренко О.И., Каратеев А.М., Евтушенко Н.С., Бережная А.В. Использование смолы ОФОС в литейном производстве. *Процессы литья*. 2010. 6(84). С. 27–32.
12. Евтушенко Н.С., Шинский О.И., Пономаренко О.И. Исследование свойств регенерируемых смесей на основе ОФОС. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2013. 4(34). С. 48–51.
13. Берлизева Т.В., Пономаренко О.И., Качанова Н.А. Моделирование свойств ХТС на основе хромитового песка и циклокарбонатов. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2015. 1(39). С. 48–51.
14. Дорошенко С. П. Формувальні суміші. Київ: ІЗМН. 1997. 140 с.
15. Liutyi R., Liuta D., Petyk I. Structural construction of binders based on orthophosphoric acid and refractory materials. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6667769>
16. Кеуш Д.В. Закономерности образования связующих из ортофосфорной кислоты и огнеупорных наполнителей. *Процессы литья*. 2015. 4(112). С. 40–46.
17. Liutyi R., Tyshkovets M., Liuta D. Foundry core mixtures with orthophosphoric acid and different aluminum-containing compounds. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. 21(1), pp. 176–184. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.176-184>
18. Лютий Р.В., Федоров М.М., Дьяченко Ю.Г., Кочешков А.С., Демчук Г.В., Люта Д.В. Технологічні властивості стрижневих сумішей з фосфатами алюмінію, цирконію та кремнію для виготовлення литих заготовок штампового інструменту. *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. Краматорськ: ДДМА. 2023. 1(52). С. 207–215. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)207](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)207)
19. Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Сайгушкина В.А. Стержневая смесь с сульфатным связующим. *Литейное производство*. 2014. 8. С. 11–12.
20. Лютий Р.В., Гурия І.М., Шаповалова Д.В., Кеуш Д.В. Образование связующих композиций в формовочных смесях на основе ортофосфорной кислоты и солей металлов. *Литейное производство*. 2013. 5. С. 16–19.

REFERENCES

1. Bartel G.P., Fedorov N.N., Tupchienko V.I. A promising technology for the manufacture of wear-resistant cast die tools. *Materials of the II International Scientific and Practical Conference «Heavy Mechanical Engineering. Problems and Prospects for Development»*. Kramatorsk. DSEA. 2004, p. 113. (in Russian).
2. Minitskiy A.V., Stepanov O.V., Radchuk S.V., Byba Ye.G., Loboda P.I. 3D Printing of Iron-Based Lattice Structures Produced by Selective Laser Melting. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2022. 61, pp. 189–196. <https://doi.org/10.1007/s11106-022-00306-9>
3. Minitskiy A. BybaYe., Minitska N., Radchuk S. A study of the structure and properties of materials based on an iron – copper composite powder. *Eastern-European Journal of enterprise technologies*. 2019. 2/12(98), pp. 44–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164017>
4. Makarevych O.P., Fedorov G.E., Platonov E.O. Production of castings from special steels. Kyiv: Publishing House of NTUU "KPI". 2005. 712 p. (in Ukrainian).
5. Khilchevsky V.V., Kondratyuk S.E., Stepanenko V.O., Lopatko K.G. Materials science and technology of structural materials: teaching manual. Kyiv: Lybid. 2002. 328 p. (in Ukrainian).
6. Bokov V.M. Design and manufacture of stamps. Design of stamps: shape-changing, complex action, for assembly and automatic stamping: teaching manual. Kirovohrad: Imex-LTD. 2010. 321 p. (in Ukrainian).
7. Special methods of casting. Reference book. Ed. V. A. Efimov. Moscow: Mashinostroenie. 1991. 436 p. (in Russian).
8. Liutyi R.V., Guriya I.M. Formative materials. Textbook. Kiev: I. Sikorskyi KPI. 2020. 257 p. (in Ukrainian).
9. Fedorov N.N. Methodological aspects of determining the properties of bentonite molding clays. *Casting and Metallurgy*. 2014. 4 (77), pp. 19–23. (in Russian).
10. Fedorov N.N. Additive method of changing the properties of bentonite molding clay. *Herald of the Donbass State Engineering Academy*. 2010. 3(20), pp. 249–253. (in Russian).
11. Ponomarenko O.I., Karateev A.M., Evtushenko N.S., Berezhnaya A.V. The use of OPOS resin in foundry production. *Casting Processes*. 2010. 6 (84), pp. 27–32. (in Russian).
12. Evtushenko N.S., Shinskii O.I., Ponomarenko O.I. Study of the properties of regenerated mixtures based on OFOS. *Compressor and Power Engineering*. 2013. 4(34), pp. 48–51. (in Russian).
13. Berlizeva T.V., Ponomarenko O.I., Kachanova N.A. Modeling the properties of CTS based on chromite sand and cyclocarbonates. *Compressor and Power Engineering*. 2015. 1(39), pp. 48–51. (in Russian).
14. Doroshenko S.P. Molding mixtures. Kyiv: IZMN. 1997. 140 p. (in Ukrainian).
15. Liutyi R., Liuta D., Petryk I. Structural construction of binders based on orthophosphoric acid and refractory materials. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6667769>
16. Keush D.V. Patterns of the formation of binders from phosphoric acid and refractory fillers. *Casting Processes*. 2015. 4 (112), pp. 40-46. (in Russian).
17. Liutyi R., Tyshkovets M., Liuta D. Foundry core mixtures with orthophosphoric acid and different aluminum-containing compounds. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. 21, pp. 176–184. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.176-184>
18. Liutyi R.V., Fedorov M.M., Dyachenko Yu.G., Kocheshkov A.S., Demchuk G.V., Liuta D.V. Technological properties of rod mixtures with phosphates of aluminum, zirconium and silicon for the production of cast blanks of stamping tools. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2023. 1(52), pp. 207–215. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)207](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)207) (in Ukrainian).
19. Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Saygushkina V.A. Core mixture with sulfate binder. *Foundry production*. 2014. 8, pp.11-12. (in Russian).
20. Liutyi R.V., Guriya I.M., Shapovalova D.V., Keush D.V. Formation of binder compositions in molding mixtures based on orthophosphoric acid and metal salts. *Foundry production*. 2013. 5, pp. 16–19. (in Russian).

Fedorov M., Liutyi R., Dyachenko Yu., Kocheshkov A., Liuta D. Phosphate binders for the manufacture of casting molds in technologies for casting die tool blanks.

Casting technologies for the production of die tool parts have significant advantages over the use of forgings, rolled bars or powder parts. The steels used for die inserts, dies, punches and other parts generally have satisfactory casting properties and produce precision castings. However, the choice of casting method remains a pressing issue today, since die casting technologies are expensive, energy- and material-intensive. The production of such parts is small-scale, while leading foundry technologies are designed for large series or mass production. An important task is to create technological conditions for the production of work pieces from alloy steels using a minimum amount of materials, which, in turn, are accessible and cheap. Compared to the special casting methods that are used now, casting in one-time molds allows us to solve this problem. At the same time, a new question arises - the creation of effective molding materials suitable for this technology and oriented to the conditions of small-scale production, that is, high-quality and easy-to-use core mixtures. The article presents the results of a study of the processes of formation of binders in systems of orthophosphoric acid with metal sulfates such as $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $MnSO_4 \cdot 5H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ or $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$. It has been experimentally established that all of these sulfates, when heated in the range from 150 °C to 300 °C, enter into a chemical interaction with orthophosphoric acid, resulting in hardening of mixtures based on them. Systems with iron and aluminum sulfates have the best performance as binders for core mixtures. For them, the optimal ratios of sulfate

and acid, heating temperature and the required binder content in the mixture have been established. Various methods for preparing mixtures have been studied and the feasibility of pre-mixing metal sulfates with orthophosphoric acid to obtain a solution or dry composition has been established. Laboratory tests consisted of using mixtures for casting high-alloy chrome-aluminum steel. The castings do not have burn marks or other surface defects, and therefore the developed core mixtures are potentially suitable for casting alloy steels, including die steels.

Keywords: die tool, casting, Gibbs energy, binder, alloy steel, phosphoric acid, compressive strength, core mixture, metal sulfates.

Федоров Микола Миколайович – канд. техн. наук, доц. ДДМА
Fedorov Mykola – Candidate of Technical Science, Associate Professor DSEA
E-mail: nikolay.fyodorov@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2149-5861>

Лютий Ростислав Володимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»
Liutyi Rostislav – Candidate of Technical Science, Associate Professor, NTUU «KPI»
E-mail: rvl2005@ukr.net
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6655-6499>

Дьяченко Юрій Григорович – канд. техн. наук, доц. ДДМА
Dyachenko Yuri – Candidate of Technical Science, Associate Professor, DSEA
E-mail: dyachenko.yurij.1978@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0711-8354>

Кочешков Анатолій Сергійович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»
Kocheshkov Anatoly – Candidate of Technical Science, Associate Professor, NTUU «KPI»
E-mail: asko@iff.kpi.ua
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6923-1403>

Люта Дар'я Вікторівна – канд. техн. наук, НТУУ «КПІ»
Liuta Dar'ya – Candidate of Technical Science, Associate Professor, NTUU «KPI»
E-mail: dawusikya@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5247-4713>

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ
” NTUU “KPI” – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv

Стаття надійшла до редакції 12.07.24 р.