

<https://doi.org/10.15407/plit2025.03.062>

УДК 621.745; 666.9.03

Р.В. Лютий*, докт. техн. наук, доцент; e-mail: rvl2005@ukr.net;
ORCID: 0000-0001-6655-6499

О.М. Мисливченко**, канд. техн. наук, стар. досл.;
e-mail: zvyagina47@gmail.com; ORCID: 0000-0003-0394-9708

М.М. Федоров***, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: nikolay.fyodorov@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2149-5861

А. С. Кочешков*, канд. техн. наук, доцент; e-mail: asko@ukr.net;
ORCID: 0000-0001-6923-1403

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

**Інститут проблем матеріалознавства НАН України (Київ, Україна)

***Донбаська державна машинобудівна академія (м. Краматорськ, Україна)

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ СТВОРЕННЯ АЛЮМОФОСФАТНИХ ТА КРЕМНІЙФОСФАТНИХ ЗВ'ЯЗУВАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ СТРИЖНЕВИХ СУМІШЕЙ

Метою представленої роботи є теоретичне й практичне дослідження можливостей використання попередньо синтезованих пірофосфату кремнію та гідрофосфату алюмінію як зв'язувальних матеріалів для стрижневих сумішей у ливарному виробництві. Уперше досліджено механізм формування міцності стрижневих сумішей із попередньо синтезованими фосфатами кремнію та алюмінію. Фосфати алюмінію нерозчинні у воді, але розчинні в ортофосфорній кислоті. Завдяки цьому, поєднання гідрофосфату алюмінію з ортофосфорною кислотою у складі суміші забезпечує твердіння після нагрівання до 150 °С. Пірофосфат кремнію нерозчинний в ортофосфорній кислоті, тому його додавання до суміші в готовому вигляді не забезпечує твердіння. Отже, попередньо приготовлений пилоподібний гідрофосфат алюмінію повторно проявляє зв'язувальну здатність у поєднанні з ортофосфорною кислотою, тому належить до зв'язувальних матеріалів зі зворотним характером твердіння. Пірофосфат кремнію повторно не проявляє зв'язувальну здатність і належить до зв'язувальних матеріалів із незворотним характером твердіння. За результатами теоретичних досліджень та визначених висновків, уперше створено суміш на основі сухого пилоподібного гідрофосфату алюмінію, який, порівняно із раніше відомими рідкими алюмофосфатами, має тривалий термін зберігання, стабільні властивості та нижчу вартість. При вмісті 3 % гідрофосфату алюмінію та 3 % ортофосфорної кислоти після сушіння при температурі 150 °С зразки суміші мають міцність при стисканні в межах від 2,0 до 2,5 МПа. Стрижневі суміші з обома зв'язувальними компонентами забезпе-

чують чисту без пригару поверхню виливків із залізовуглецевих сплавів із шорсткістю близько 30 мкм. Важливою перевагою є можливість використання стрижнів без протипригарного покриття. Також досліджено залишкову міцність стрижневої суміші з пірофосфатом кремнію після нагрівання в інтервалі температур від 500 до 1000 °C та охолодження та встановлено причини різної трудомісткості вибивання стрижнів із чавунних і сталевих виливків. Цей результат підтверджено прямими експериментами щодо визначення роботи вибивання.

Ключові слова: вибиваємість, виливок, ортофосфорна кислота, стрижнева суміш, пилоподібний кварц, пірофосфат кремнію, пригар, фазовий аналіз, фосфат алюмінію.

Вступ

Зв'язувальні матеріали на основі фосфатів спеціалісти ливарної галузі різних країн розглядають як найбільшу альтернативу синтетичним (органічним) матеріалам [1–3]. Серед переваг відзначають у першу чергу екологічність. Для ливарної технології, зрештою, важливими є висока термостійкість та низька хімічна активність до металевих розплавів. Указані властивості дають змогу виготовляти виливки широкої номенклатури зі сплавів на основі заліза без поверхневих дефектів.

Альтернативою широко дослідженим у 70–80-х рр. XX ст. формувальним і стрижневим сумішам із фосфатами Fe і Mg [4, 5] є суміші з фосфатами Al. Вони містять алюмофосфатний зв'язувальний компонент або комплексні зв'язувальні компоненти, які додатково містять іони Cr, Mg, B, Fe, Ca, Zn, інколи навіть Na. Для забезпечення твердіння таких композицій необхідне нагрівання до температури від 200 до 300 °C [4, 6]. Технології синтезу таких фосфатних зв'язувальних компонентів тривалі та багатоопераційні, термін придатності готових продуктів, як правило, не перевищує 6 місяців.

Варіанти отримання фосфатних зв'язувальних компонентів безпосередньо в складі стрижневих сумішей під час їх теплового твердіння вперше розглянуто у наших попередніх роботах [7, 8]. Зокрема, фосфати алюмінію з високим зв'язувальним потенціалом отримано в результаті хімічної взаємодії ортофосфорної кислоти H_3PO_4 з алюмосилікатними матеріалами (найкращий результат із дистен-силіманітом) [9]. Розроблено також композицію на основі фосфату Si, який утворюється в ній унаслідок хімічної взаємодії H_3PO_4 із пилоподібним кварцом [10, 11, 12]. На відміну від подібних сумішей, які протягом багатьох десятиріч використовують для виготовлення вогнетривких виробів і піддають спіканню в інтервалі температур 900... 1300 °C [6], умови твердіння розроблених стрижневих сумішей — це нагрівання від 300 до 320 °C, що технологічно допустимо під час виготовлення стрижнів. Додатково підтверджено, що потрапляння залишків стрижнів із фосфатом кремнію, виготовлених за цією технологією, в оборотну формувальну суміш не впливає на весь комплекс її властивостей [13].

На сьогодні достовірно встановлено те, що під час взаємодії H_3PO_4 з пилоподібним SiO_2 в процесі нагрівання утворюється пірофосфат кремнію SiP_2O_7 , який виконує роль зв'язувального компонента у стрижневій суміші. Однак інформації щодо властивостей стрижневої суміші з цим фосфатом під час нагрівання (вбиваємість, залишкова міцність) поки що немає. Крім того, відомо, що фосфатні зв'язувальні компоненти повторно не проявляють зв'язувальної здатності, тобто вони є матеріалами одноразового використання. Щодо пірофосфату кремнію таких досліджень не проведено. По суті, він являє собою суху нерозчинну у воді речовину, яка може зберігатися тривалий час і бути використана при потребі. Але придатність попередньо синтезованого пірофосфату кремнію для використання у складі стрижневих сумішей досі не встановлено.

Фосфати алюмінію також існують не тільки у вигляді кислотних розчинів (алюмофосфатних чи комплексних зв'язувальних компонентів), а й у вигляді твердих хімічних сполук. Найбільш поширеним і стійким є кислий фосфат $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$, який може існувати в різних кристалогідратних формах. Цей матеріал взагалі не було досліджено щодо прояву зв'язувальних властивостей.

Метою нашої роботи є встановлення зв'язувальних властивостей попередньо синтезованих пірофосфату кремнію та гідрофосфату алюмінію та визначення їх технологічної придатності для стрижневих сумішей у ливарному виробництві.

У процесі виконання досліджень було розв'язано такі завдання:

1) досліджено фізико-хімічні особливості утворення пірофосфату кремнію в системі $\text{H}_3\text{PO}_4 - \text{SiO}_2$;

2) проаналізовано термічну стійкість суміші із кварцового вогнетривкого наповнювача й зв'язувального компонента — пірофосфату кремнію за умов заливання залізовуглецевими сплавами;

3) визначено схильність сумішей із пірофосфатом кремнію та гідрофосфатом алюмінію до утворення пригару на поверхні литих деталей із залізовуглецевого сплаву;

4) визначено можливість застосування попередньо синтезованих пірофосфату кремнію та гідрофосфату алюмінію як зв'язувальних матеріалів у комплексі із кварцовим вогнетривким наповнювачем.

Матеріали та методи досліджень

В експериментах було використано ортофосфорну кислоту технічну термічну у вигляді 85 %-го водного розчину, кварц пилоподібний марки КП-1, гідрофосфат алюмінію $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$, пісок на основі кварцу марки $\text{ЗК}_5\text{O}_3\text{O25}$.

Для визначення якісного та кількісного фазового складу утворених зв'язувальних компонентів проводили рентгенофазовий аналіз на установці «Rigaku» моделі «Ultima IV». Міцність зразків стрижневих сумішей при стисканні визначали на установці УС-700.

Для визначення стійкості стрижневих сумішей до утворення пригару застосовано технологічну пробу у вигляді шестигранного виливка з товщинами стінок від 5 до 40 мм (рис. 1, а).

Вибиравість контролювали за сумарною роботою руйнування та вилучення стандартного циліндричного зразка суміші з технологічної проби, зображеної на рис. 1 (б).

Шорсткість литих поверхонь визначали на технологічних пробах, зображених на рис. 1 (а) за допомогою профілометра моделі 107622.

Результати та їх обговорення

Для встановлення особливостей утворення зв'язувального компонента в системі ортофосфорної кислоти з пилоподібним кварцом було виготовлено ряд технологічних

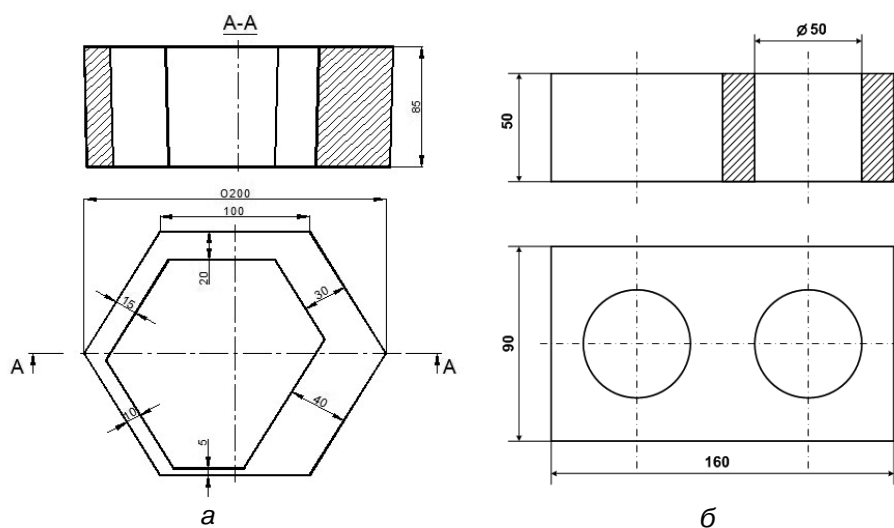
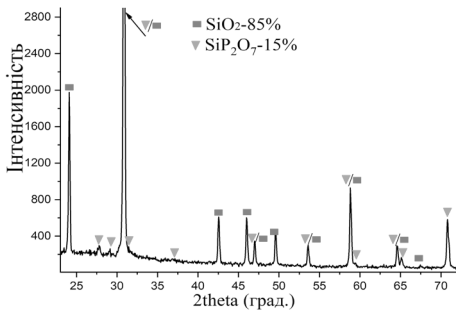


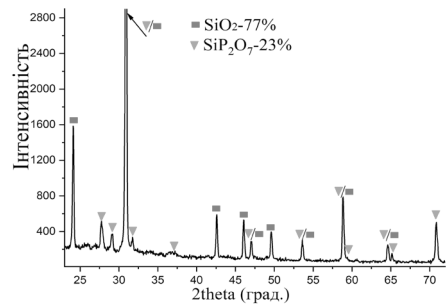
Рис. 1. Технологічні проби для визначення стійкості формувальних і стрижневих сумішей до утворення пригару (а) та трудомісткості вилучення стрижнів із литих деталей (б)

проб для проведення рентгенофазового аналізу. До складу проб входили ортофосфорна кислота, пілоподібний кварц та продукти їх попередньої взаємодії. Після змішування компонентів проби піддавали витримці в печі при температурі 300 °С протягом 1 год.

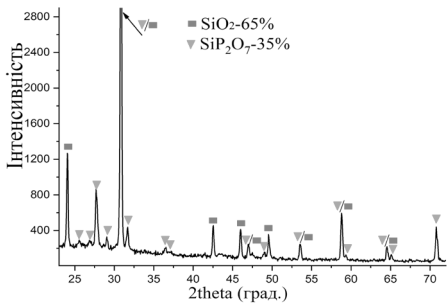
Оброблені дифрактограми досліджених проб наведено на рис. 2 (а–д).



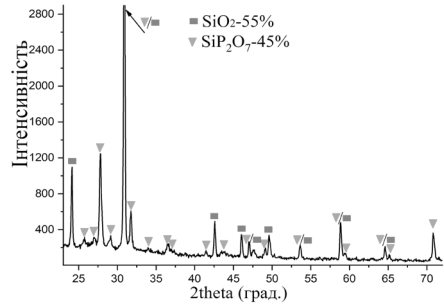
а



б



в



г

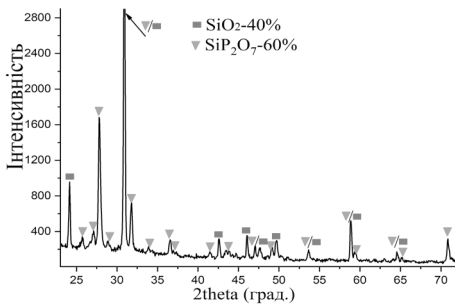


Рис. 2. Дифрактограми проб ортофосфорної кислоти з пілоподібним кварцом: а — 5 мас. ч. кварцу і 1 мас. ч. кислоти; б — 5 мас. ч. проби «а» і 1 мас. ч. кислоти; в — 5 мас. ч. проби «б» і 1 мас. ч. кислоти; г — 5 мас. ч. проби «в» і 1 мас. ч. кислоти; д — 5 мас. ч. проби «г» і 1 мас. ч. кислоти

Аналіз дифрактограм показує, що кількість пірофосфату кремнію у складі проб поступово зростає від 15 % до 60 %, але все одно в їх складі залишається пілоподібний кварц. Склад першої проби (рис. 2, а) майже повторює попередньо отримані дані [8, 12], тобто кількість утвореного пірофосфату кремнію незначна. При цьому стає очевидним, що після поетапного додавання ортофосфорної кислоти до проб, які вже містять певну кількість пірофосфату кремнію, він залишається без змін, а частина пілоподібного кварцу, реагуючи з кислотою, перетворюється на цю хімічну сполуку, збільшуючи її загальний вміст. Оскільки саме пірофосфат кремнію виконує роль зв'язувального компонента, проби з його більшим вмістом мають забезпечити більшу міцність стрижневої суміші.

Пірофосфат кремнію є неорганічним зв'язувальним компонентом, який, за даними [6], має високу термічну стійкість і придатний для виготовлення вогнетривких виробів. У складі стрижневої суміші висока міцність у нагрітому або гарячому стані, навпаки, небажана, оскільки ускладнює умови вибивання стрижнів із виливків. Для встановлення трудомісткості вибивання ливарних стрижнів із цим зв'язувальним компонентом виконано два паралельних експерименти — непрямий та прямий. Під час непрямого експерименту виготовляли стандартні циліндричні зразки стрижневої суміші на основі кварцового піску з додаванням 4 % ортофосфорної кислоти і 7 % пилоподібного кварцу, які зміцнювали при температурі 300 °С протягом 1 год. Готові зразки піддавали ізотермічній витримці протягом 1 год при різних температурах від 500 до 1000 °С. Після їх остаточного охолодження визначали залишкову міцність. Результати представлено на рис. 3.

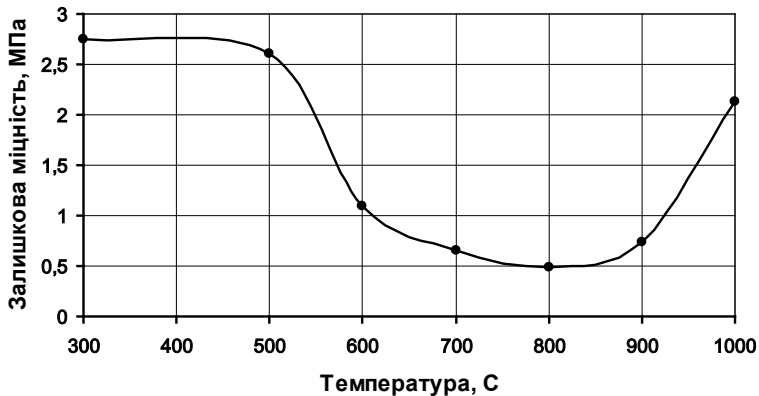


Рис. 3. Залежність залишкової міцності суміші з пірофосфатом кремнію від температури

Із аналізу рис. 3 стає зрозумілим, що в разі прогрівання ливарного стрижня до температур від 700 до 900 °С його залишкова міцність має бути мінімальною. Початок зниження міцності припадає на інтервал від 500 до 600 °С, у якому кварцовий наповнювач має поліморфне перетворення, що створює внутрішні напруження на межі наповнювач — зв'язувальний компонент. В інтервалі від 600 до 900 °С спостерігаємо відносно невелику залишкову міцність. Це свідчить про те, що прогрівання ливарного стрижня до цієї температури має забезпечити відносно легке його вилучення із виливка. Відповідно, прогрівання стрижня вище 900 °С значною мірою погіршує його вибиваємість.

Роботу вибивання стрижневої суміші того ж самого складу перевірено за технологічною пробою, наведеною на рис. 1 (б). Проби заливали сталлю 25Л при температурі (1550 ± 20) °С і чавуном СЧ 200 при температурі (1350 ± 20) °С. Заливали розплавом по 4 зразки. За середніми арифметичними даними, робота вибивання стрижнів із сталевих виливків складала близько 290 Дж, із чавунних — 40 Дж. Цей практичний результат підтверджує, що більш значне прогрівання стрижня призводить до погіршення його вибиваємість, що узгоджується з даними рис. 3. При цьому робота вибивання стрижневої суміші все одно є меншою, порівняно із сумішами з іншим поширеним неорганічним матеріалом — рідким склом, але значно більшою, ніж у стрижнів з органічними зв'язувальними компонентами.

Для встановлення можливості повторного застосування кремній- та алюмофосфатних зв'язувальних компонентів у складі стрижневих сумішей було проведено таке випробування. У складі сумішей було використано попередньо синтезовані фосфати алюмінію й кремнію. На рис. 4 наведено залежність міцності зразків суміші від вмісту пилоподібного фосфату алюмінію $Al_2(HPO_4)_3 \cdot 2,5H_2O$. Дослідження проведено за двох умов: додавання як рідкого компонента ортофосфорної кислоти — 3 % та додавання води — 3 %. Зразки сушили протягом 1 год при температурі 150 °С (оптимальне значення температури встановлено у попередній роботі [14]).

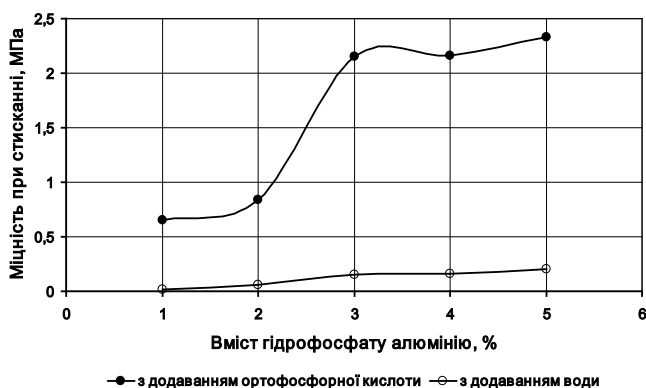


Рис. 4. Залежність міцності сумішей від вмісту гідрофосфату алюмінію

За результатами дослідів (див. рис. 4) стає очевидним, що гідрофосфат алюмінію проявляє свою зв'язувальну здатність виключно в поєднанні з ортофосфornoю кислотою. Міцність зразків достатня для виготовлення ливарних стрижнів. Це пояснюється тим, що фосфати алюмінію нерозчинні у воді. Натомість вони є розчинними в кислоті, про що свідчать численні дослідження будови й складу рідких алюмофосфатних розчинів [6]. Після змішування з водою гідрофосфат алюмінію утворює лише суспензію, яка покриває частинки вогнетривкого наповнювача. Після змішування з кислотою він утворює розчин, подібний до раніше відомих рідких алюмофосфатних зв'язувальних компонентів. Під час сушіння відбувається кристалізація фосфату алюмінію в першому випадку із суспензії, а у другому — із розчину. Ця різниця забезпечує міцний адгезійний зв'язок із частинками наповнювача за умови використання як рідкої складової ортофосфornoї кислоти.

Таким чином, доведено можливість використання сухих фосфатів алюмінію, які мають практично необмежений термін придатності і стабільні властивості як зв'язувальних компонентів у складі стрижневих сумішей.

Фосфати кремнію, як і фосфати алюмінію, також є нерозчинними у воді, тому для дослідження можливості їх повторного використання до складу сумішей додавали їх тільки разом з ортофосфornoю кислотою. Характер зміни міцності зразків із 3 % кислоти та 3 % сухих проб показано на рис. 5, фазовий та хімічний склад цих проб визначено на рис. 2. До складу першої суміші (на рис. 5 відповідає вмісту 0 % пірофосфату кремнію) введено 3 % кислоти і 5 % пилоподібного кварцу, а пірофосфат



Рис. 5. Залежність міцності суміші від кількості в її складі попередньо синтезованого пірофосфату кремнію

кремнію утворився в ній вже після теплового зміцнення зразків. Зразки зміцнювали 1 год при температурі 300 °С.

Наведені на рис. 5 дані свідчать про те, що попередньо синтезований пірофосфат кремнію не може бути використано для приготування стрижневої суміші. Стає очевидним, що, на відміну від фосфату алюмінію, фосфат кремнію не утворює розчину з ортофосфорною кислотою, а тому не здатний зміцнювати суміш.

Для стрижневої суміші з пірофосфатом кремнію єдиним можливим способом приготування є окреме додавання до її складу ортофосфорної кислоти та пилоподібного кварцу. Хімічна взаємодія між ними відбувається під час нагрівання і призводить до двох паралельних процесів — утворення пірофосфату кремнію та створення ним міцних адгезійних зв'язків із наповнювачем.

Щодо схильності до утворення пригару було досліджено дві суміші. До складу першої входило 4 % ортофосфорної кислоти і 7 % пилоподібного кварцу (оптимальний склад встановлено в роботі [12]), стрижень сушили при температурі 300 °С. До складу другої суміші входило 3 % пилоподібного гідрофосфату алюмінію та 3 % ортофосфорної кислоти, стрижень сушили при температурі 150 °С. Перед встановленням у форми стрижні не фарбували. Заливали чавуном з температурою (1500 ± 20) °С. Отримані виливки після вилучення стрижнів наведено на рис. 6.

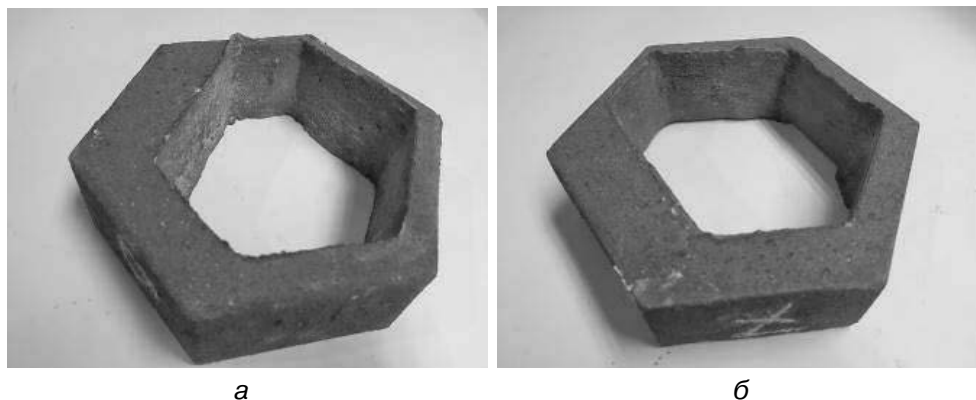


Рис. 6. Технологічні проби на пригар, виготовлені із застосуванням стрижнів: а — із пірофосфатом кремнію; б — із гідрофосфатом алюмінію

Установлено, що обидві суміші не утворюють пригару на поверхні чавунних виливків із товщиною стінок від 5 до 40 мм. Отже, технологічну операцію фарбування, яка є майже обов'язковою для всіх ливарних стрижнів, можна усунути. Необхідність теплового зміцнення стрижнів протягом від 1 до 2 год у такому разі не призведе до збільшення циклу їх виготовлення.

Також за допомогою профілометра було визначено шорсткість внутрішніх поверхонь стінок виливків у середньому за товщиною перерізі (20 мм). Результати вимірювання шорсткості показали, що литі поверхні відповідають 2 класу та 12...13 ступеню точності за ДСТУ 8981:2020 (на заміну ГОСТ 26645–85). Середня шорсткість поверхонь обох виливків — близько 30 мкм. Таким чином, досліджені стрижневі суміші забезпечують задовільну якість литих поверхонь без пригару.

Висновки

1. Уперше досліджено та підтверджено можливість використання попередньо синтезованого сухого фосфату алюмінію як зв'язувального компонента у складі стрижневої суміші.

2. Показано принципову різницю властивостей сумішей із порошковим гідрофосфатом алюмінію за умов додавання двох різних рідких компонентів: ортофосфорної кислоти та води. Унаслідок нерозчинності фосфатів алюмінію у воді та їх розчинності в кислоті, суміші з водою мають близьку до нуля міцність, а з кислотою — від 2,0 до 2,5 МПа, що є достатнім для виготовлення ливарних стрижнів.

Отже, в поєднанні з кислотою гідрофосфат алюмінію є зв'язувальним компонентом зі зворотним характером твердіння.

3. Визначено, що багаторазове додавання до пилоподібного кварцу або його суміші з пірофосфатом кремнію ортофосфорної кислоти з подальшим нагріванням до температури 300 °C призводить до поступового зростання відсоткового вмісту в композиції пірофосфату кремнію та відповідного зниження вмісту пилоподібного кварцу. Таким чином, встановлено можливість попереднього синтезу пірофосфату кремнію.

4. Доведено, що, на відміну від сухого гідрофосфату алюмінію, пірофосфат кремнію не може бути використано для приготування стрижневих сумішей, оскільки він повторно не проявляє зв'язувальної здатності. Тому єдиним варіантом використання суміші з пірофосфатом кремнію є його утворення безпосередньо в стрижні під час теплового зміцнення за рахунок хімічної взаємодії ортофосфорної кислоти з пилоподібним кварцом. Пірофосфат кремнію є зв'язувальним компонентом із незворотним характером твердіння.

5. Досліджено залишкову міцність та вибиваємість стрижневої суміші з пірофосфатом кремнію. Установлено, що після нагрівання в межах від 600 до 900 °C залишкова міцність є мінімальною, що забезпечує роботу вибивання стандартних зразків із чавунних виливків на рівні 40 Дж. У разі прогрівання стрижнів вище 900 °C залишкова міцність значною мірою зростає, що призводить до підвищення роботи вибивання зразків із сталевих виливків до 290 Дж.

6. Проведено дослідження схильності стрижневих сумішей із пірофосфатом кремнію та гідрофосфатом алюмінію до утворення пригару. Визначено, що стрижні без протипригарних покриттів забезпечують чисті поверхні чавунних виливків із товщинами від 5 до 40 мм із шорсткістю на рівні 30 мкм, що відкриває для них можливість використання у ливарному виробництві.

Список літератури

- 1 Solonenko L. I., Repyakh S. I., Prokopovitch I. V., Sukhoi K. M., Dmytrenko D. O. System analysis of modern areas of increasing environmental and sanitary hygienic safety of using cold hardening mixtures in foundry. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2019. №1(57), 90–98. <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/8735>
- 2 Major-Gabryś K. Environmentally Friendly Foundry Molding and Core Sands. *Journal of Material Engineering and Perform.* 2019. 28, 3905–3911. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-03947-x>
- 3 Fortini A., Merlin M., Raminella G. A. Comparative Analysis on Organic and Inorganic Core Binders for a Gravity Diecasting Al Alloy Component. *Inter Metalcast*. 2022. 16, 674–688. <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00628-1>
- 4 Дорошенко С. П., Авдокушин В. П., Русин К., Мацашек И. Формовочные материалы и смеси. Київ.: Вища школа, 1990. – 415 с.
- 5 Дорошенко С. П. Формувальні суміші. Київ.: ІЗМН, 1997. 140 с.
- 6 Судакас Л. Г. Фосфатные вяжущие системы. Санкт-Петербург: РИА «Квинтет», 2008. – 260 с.
- 7 Liutyi R. V., Tyshkovets M. V., Liuta D. V. Foundry core mixtures with orthophosphoric acid and different aluminum-containing compounds. *Physics and chemistry of solid state*. 2020. 21 (1), 176–184. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.176-184>
- 8 Кеуш Д. В. Закономерности образования связующих из ортофосфорной кислоты и огнеупорных наполнителей. *Процеси лиття*. 2015. №4(112), 40–46.
- 9 Liutyi R. V., Liuta D. V., 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>

- 10 Лютий Р. В., Кочешков А. С., Кеуш Д. В. Формовочные и стержневые смеси с фосфатными связующими и комбинированным наполнителем, отверждаемые при нагреве. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2011. 1(22), 203–206.
- 11 Лютий Р. В., Кочешков А. С., Кеуш Д. В. Исследование влияния зернового состава кварцевых наполнителей на свойства смесей с фосфатами кремния. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2011. 4(25), 98–103.
- 12 Лютий Р. В., Кеуш Д. В. Связующая система $\text{SiO}_2 - \text{H}_3\text{PO}_4$ для литейных стержней. *Литейное производство*. 2017. 4, 23–28.
- 13 Лютий Р.В., Федоров М. М., Люта Д.В., Бондар А.К., Павлюх С.В. Зміна комплексу властивостей піщано-бентонітової суміші при додаванні звороту стрижнів з фосфатним зв'язувальним компонентом. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2017. 2(41), 54–59.
- 14 Лютий Р.В., Гурія І.М., Кеуш Д.В., Анісімова О.А. Визначення оптимального складу стрижневих сумішей з новими зв'язувальними компонентами, які утворюються при взаємодії ортофосфорної кислоти з неорганічними солями алюмінію // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2013. №2(12Е), 17–24.

Надійшла 15.05.2025

References

- 1 Solonenko L. I., Repyakh S. I., Prokopovitch I. V., Sukhoi K. M., Dmytrenko D. O. System analysis of modern areas of increasing environmental and sanitary hygienic safety of using cold hardening mixtures in foundry. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2019. №1(57), 90–98. <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/8735>
- 2 Solonenko L. I., Repyakh S. I., Prokopovitch I. V., Sukhoi K. M., Dmytrenko D. O. System analysis of modern areas of increasing environmental and sanitary hygienic safety of using cold hardening mixtures in foundry. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2019. №1(57), 90–98. <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/8735>
- 3 Fortini A., Merlin M., Raminella G. A. Comparative Analysis on Organic and Inorganic Core Binders for a Gravity Diecasting Al Alloy Component. *Inter Metalcast*. 2022. 16, 674–688. <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00628-1>
- 4 Doroshenko S. P., Avdokushin V. P., Rusin K., Matsashek I. (1990). Forming materials and mixtures. Kyiv: Vyscha shkola. 415 p. [in Russian].
- 5 Doroshenko S. P. (1997). Molding mixtures. Kyiv: IZMN. 140
- 6 Sudakas L. G. (2008). Phosphate binding systems. sankt-petersburg: RIA Kvintet. 260 p. [in Russian].
- 7 Liutyi R. V., Tyshkovets M. V., Liuta D. V. Foundry core mixtures with orthophosphoric acid and different aluminum-containing compounds. *Physics and chemistry of solid state*. 2020. 21 (1), 176–184. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.176-184>
- 8 Keush D. V. (2015). Regularities of formation of binders from orthophosphoric acid and refractory fillers. *Processy litya*. 4(112), 40–46.
- 9 Liutyi R. V., Liuta D. V., 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>
- 10 Liutyi R.V., Kocheshkov A.S., Keush D.V. (2011). Molding and core mixtures with phosphate binders and combined filler, hardened by heating. *Herald of Donbass State Engineering Academy*. 1(22), 203–206. [in Russian].
- 11 Liutyi R.V., Kocheshkov A.S., Keush D.V. (2011). Investigation of the influence of the grain composition of quartz fillers on the properties of mixtures with silicon phosphates. *Herald of Donbass State Engineering Academy*. 4(25), 98–103. [in Russian].
- 12 Liutyi R.V., Keush D.V. (2017). Binding system $\text{SiO}_2 - \text{H}_3\text{PO}_4$ for foundry cores. *Litejnoye proizvodstvo*. 4, 23–28. [in Russian].

- 13 Liutyi R.V., Fyodorov M.M., Liuta D.V., Bondar A.K., Pavlyuch S. V. (2017). Change in the set of properties of the sand-bentonite mixture with the addition of turning cores with a phosphate binder. Herald of Donbass State Engineering Academy. 2(41), 54–59. [in Ukrainian].
- 14 Liutyi R. V., Guriya I. M., Keush D. V., Anysymova O. A. (2013). Determination of the optimal composition of core mixtures with new binders, which are formed during the interaction of orthophosphoric acid with inorganic aluminum salts. Herald of Donbass State Engineering Academy. 2(12E), 17–24. [in Ukrainian].

Received 15.05.2025

R. V. Liutyi*, *Dr. Sci. (Engin.), Associate Professor; e-mail: rvl2005@ukr.net; ORCID: 0000-0001-6655-6499*

O. M. Myslyvchenko**, *PhD (Engin.), Senior Researcher; e-mail: zvyagina47@gmail.com; ORCID: 0000-0003-0394-9708*

N. N. Fedorov***, *PhD (Engin.), Associate Professor; e-mail: nikolay.fyodorov@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2149-5861*

A. S. Kocheshkov*, *PhD (Engin.), Associate Professor; e-mail: asko@ukr.net; ORCID: 0000-0001-6923-1403*

* National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

** Institute for Problems of Materials Sciences National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

*** Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES OF CREATION OF ALUMINUM PHOSPHATE AND SILICON PHOSPHATE BINDERS FOR CORE MIXTURES

The purpose of the presented work is a theoretical and practical study of the possibilities of using pre-synthesized silicon pyrophosphate and aluminum hydrogen phosphate as binders for core mixtures in foundry production. The mechanism of strength formation of core mixtures with pre-synthesized silicon and aluminum phosphates has been investigated for the first time. Aluminum phosphates are insoluble in water, but soluble in orthophosphoric acid. Due to this, the combination of aluminum hydrogen phosphate with orthophosphoric acid in the mixture ensures hardening after heating to 150 °C. Silicon pyrophosphate is insoluble in orthophosphoric acid, so adding it to the mixture in its pre-synthesized form does not provide hardening. Therefore, pre-synthesized powdered aluminum hydrogen phosphate re-exhibits binding ability in combination with orthophosphoric acid, therefore it belongs to binders with a reverse hardening nature. Silicon pyrophosphate does not exhibit binding ability again and belongs to binders with an irreversible hardening nature. Based on the results of theoretical research and the conclusions presented, a mixture based on pre-synthesized powdered aluminum hydrogen phosphate was created for the first time. This phosphate, compared to previously known liquid aluminophosphates, has a long shelf life, stable properties, and lower cost. With a content of 3 % aluminum hydrogen phosphate and 3 % orthophosphoric acid, after drying at a temperature of 150 °C, the mixture samples have a compressive strength in the range from 2.0 to 2.5 MPa. Core mixes with both binders provide a clean, non-sintered surface for iron-carbon alloy castings with a roughness of about 30 microns. An important advantage is the ability to use cores without a non-stick coating. The residual strength of the core mixture with silicon pyrophosphate after heating in the temperature range from 500 to 1000 °C and cooling was also investigated, and the reasons for the different labor intensity of knocking out of cores from cast iron and steel castings were established. This result was confirmed by direct experiments on determining the work of knock-out.

Keywords: knockability, casting, orthophosphoric acid, core mixture, powdered quartz, silicon pyrophosphate, burning-in, phase analysis, aluminum phosphate.