

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ СТРИЖНЕВИХ СУМІШЕЙ З НОВИМИ ЗВ'ЯЗУВАЛЬНИМИ КОМПОНЕНТАМИ, ЯКІ УТВОРЮЮТЬСЯ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ ОРТОФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ З НЕОРГАНІЧНИМИ СОЛЯМИ АЛЮМІНІЮ

Лютий Р. В., Гурія І. М., Кеуш Д. В., Анісімова О. А.

Исследована разработка связующих для стержневых смесей, которые основаны на взаимодействии ортофосфорной кислоты с неорганическими солями алюминия и упрочняются непосредственно в нагретой оснастке. Как алюмосодержащие компоненты в смесях использованы алюминиевый шлам, нитрат алюминия, гидрофосфат алюминия, сульфат алюминия. Показано, что взаимодействие каждого из данных соединений с кислотой имеет индивидуальный характер. Эти особенности использованы для достижения максимального уровня свойств смеси. Установлены оптимальные массовые соотношения соответствующих компонентов и определены режимы упрочнения стержневых смесей. Получены качественные отливки из чугуна, углеродистой и легированной стали.

Досліджено розроблення зв'язувальних компонентів для стрижневих сумішей, які базуються на взаємодії ортофосфорної кислоти із неорганічними солями алюмінію і зміцнюються безпосередньо в нагрітому оснащенні. Як алюмовмісні компоненти в сумішах використані алюмінієвий шлам, нітрат алюмінію, гідрофосфат алюмінію, сульфат алюмінію. Показано, що взаємодія кожної із даних сполук з кислотою має індивідуальний характер. Ці особливості використані для досягнення максимального рівня властивостей суміші. Встановлено оптимальні масові співвідношення відповідних компонентів та визначені режими зміцнення стрижневих сумішей. Отримані якісні виливки із чавуну, вуглецевої та легованої сталі.

This paper is devoted to the development of binder components for core mixtures, based on the interaction of phosphoric acid with inorganic salts of aluminum and strengthening directly in the hot box. As the aluminum-containing components in the mixtures used aluminum sludge, aluminum nitrate, aluminum hydrogen phosphate, aluminum sulphate. It is shown that the interaction of each of these compounds with an acid has an individual character. These features are used to achieve the maximum level properties of the mixture. The optimal mass ratio of the respective components and determine the modes of strengthening core mixtures was established. These high-quality castings of cast-iron, carbon and alloyed steel was obtained.

Лютий Р. В.

канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»
rvl2005@ukr.net

Гурія І. М.

канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»

Кеуш Д. В.

аспірант НТУУ «КПІ»
keush-1989@mail.ru

Анісімова Е. А.

студент НТУУ «КПІ»

НТУУ «КПІ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

УДК 621.74

Лютый 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

Ливарна форма є одним із основних факторів, який впливає на якість виливків. Формувальні та стрижневі суміші, в залежності від використаних матеріалів (наповнювача, зв'язувального компонента і добавок), відрізняються одна від одної комплексом фізико-механічних, технологічних та робочих властивостей. Ці властивості роблять суміш придатною для певної групи виливків (за родом сплаву, за масою тощо). Кожна суміш має, в свою чергу, ряд недоліків, які спричиняють зниження якості виливків [1].

Аналіз літературних джерел показує, що для отримання сталевих виливків більш доцільним є використання сумішей з неорганічними зв'язувальними компонентами [2]. Але досягти стабільно високого рівня властивостей цих сумішей поки не вдається.

Відомо, що цілий ряд неорганічних зв'язувальних компонентів представляють собою солі ортофосфорної кислоти, при чому дані суміші можуть бути як холоднотвердні, так і зміцнюються при нагріванні. Розвиток науки про ливарну форму пішов по першому шляху – холоднотвердні суміші (ХТС) із ортофосфорною кислотою, в той час як вони мають нестабільний склад, потребують дефіцитних компонентів, а утворені кристалогідрати підвищують гігроскопічність форм. Цих недоліків позбавлені суміші, які зміцнюються при нагріванні (в гарячому оснащенні). В такому разі основною задачею стає вибір недефіцитних матеріалів, які при взаємодії з ортофосфорною кислотою при нагріванні давали б міцний зв'язувальний компонент.

В попередніх наших публікаціях показано, що утворення зв'язувальних компонентів у сумішах можливе при спільному введенні до їх складу ортофосфорної кислоти та алюмовмісних сполук [3, 4]. Алюміній входить до їх складу у вигляді оксидів, гідроксидів або у вигляді часток чистого металу. Як носії оксиду алюмінію розглянуті вогнетривкі наповнювачі – пірофіліт, дистен-силіманіт, які вступають у взаємодію з кислотою при в інтервалі температур 250–300 °С. Суміш на основі кварцового піску з добавкою 5 % пилоподібного алюмосилікату та 3 % H_3PO_4 забезпечує міцність на стиск 1,4–1,6 МПа, обсіпаємість не більше 0,2–0,3 %.

В шламових матеріалах алюміній знаходиться переважно у вигляді часток чистого металу (до 25% за масою), але поряд із ними існують гідроксид та оксид алюмінію. Такий матеріал у поєднанні з H_3PO_4 може утворювати холоднотвердну зв'язувальну композицію з високим рівнем міцності [4]. Але з часом кількість частинок металевого алюмінію у шламових відходах зменшується, і він переходить у форму гідроксиду або оксиду. Це призводить до втрати можливості утворення холоднотвердної зв'язувальної композиції з ортофосфорною кислотою. Так, ХТС із шламовим порошком, виробленим у 2002 р., у тому ж році набирала міцність на стиск до 2,0 МПа, а суміш такого ж складу (12 % шламового порошку, 6 % H_3PO_4) у 2012 р. (тобто після довготривалої витримки порошку) – менше 0,2 МПа. Таким чином, через нестабільність властивостей даної холоднотвердної зв'язувальної системи, подальші дослідження сумішей із алюмінієвим шламом проводили на умовах теплового зміцнення.

Цікаву групу також представляють поширені в ливарному виробництві, і особливо у процесах приготування сумішей та протипригарних фарб [2], неорганічні солі алюмінію. За нашою попередньо перевіреною гіпотезою [5], переважна більшість водорозчинних солей металів здатна вступати в хімічні реакції з ортофосфорною кислотою. Крім цього, відмічаємо позитивний момент – більшість із утворених продуктів (фосфатів) у поєднанні з кварцовим наповнювачем забезпечують хороший зв'язок.

Зв'язувальні властивості фосфатів алюмінію добре відомі і тому можливість синтезу їх безпосередньо у формувальній суміші з іншої алюмовмісної речовини є питанням актуальним до вивчення.

Метою роботи є розроблення зв'язувальних компонентів для стрижневих сумішей, які базуються на взаємодії ортофосфорної кислоти із неорганічними солями алюмінію і зміцнюються безпосередньо в нагрітому оснащенні.

У роботі поставлені наступні завдання:

1. Дослідити процеси взаємодії ортофосфорної кислоти з неорганічними сполуками алюмінію при різних температурах.

2. Визначити умови утворення зв'язувальних компонентів на основі ортофосфорної кислоти і солей алюмінію.

3. За допомогою математичного планування експериментів комплексно дослідити вплив складу сумішей та температури зміцнення на їх фізико-механічні властивості.

4. Визначити оптимальний склад і спосіб зміцнення стрижневих сумішей.

5. Провести лабораторні випробування розроблених сумішей.

На підставі оброблення літературних даних та аналізу реальних можливостей забезпечення недорогими і недефіцитними матеріалами, крім алюмінієвого шламу як компоненти сумішей вибрані такі солі алюмінію: нітрат $Al(NO_3)_3$, сульфат $Al_2(SO_4)_3$ та двозаміщений ортофосфат $Al_2(HPO_4)_3$.

Суміші теплового зміцнення з алюмінієвим шламом являють собою систему, яка складається із інертного наповнювача (Дніпровський кварцовий пісок $3K_2O \cdot 2O_3$), шламу, ортофосфорної кислоти та води. Шлам – матеріал із величиною зерен до 0,63 мм, тобто за гранулометричним складом близький до вогнетривкого наповнювача. Як уже вказано вище, початкова кількість часток металевого алюмінію в шламі 25 %, але з часом вони перейшли в оксидну або гідроксидну форми.

Внаслідок даного процесу, оптимальне співвідношення між кількістю ортофосфорної кислоти і шламу в суміші відрізняється від такого ж співвідношення в ХТС [4]. В ХТС на 1 масову частину кислоти приходилось 2,0–2,5 масових частин шламу, а в суміші теплового зміцнення – 1 : 1 (рис. 1). Це пов'язано із тим, що при нагріванні до 200 °С в реакцію вступають основні сполуки алюмінію, які містяться у суміші, тобто гідроксид і частково оксид. Для утворення зв'язувального компонента та реалізації адгезійного зв'язку із наповнювачем достатньою є кількість по 5 % кислоти і шламу. Подальше збільшення кількості цих компонентів не призводить до підвищення міцності системи (рис. 1, а).

Найбільш ймовірно, шламовий пил містить в основному гідроксидну форму алюмінію, а не оксидну, для якої необхідно було б нагрівання понад 250 °С. На це вказує зниження міцності суміші при збільшенні температури сушки зразків понад 220 °С (рис. 1, б). Таким чином, оптимальною температурою зміцнення є 200–220 °С, що є традиційним значенням для гарячого оснащення.

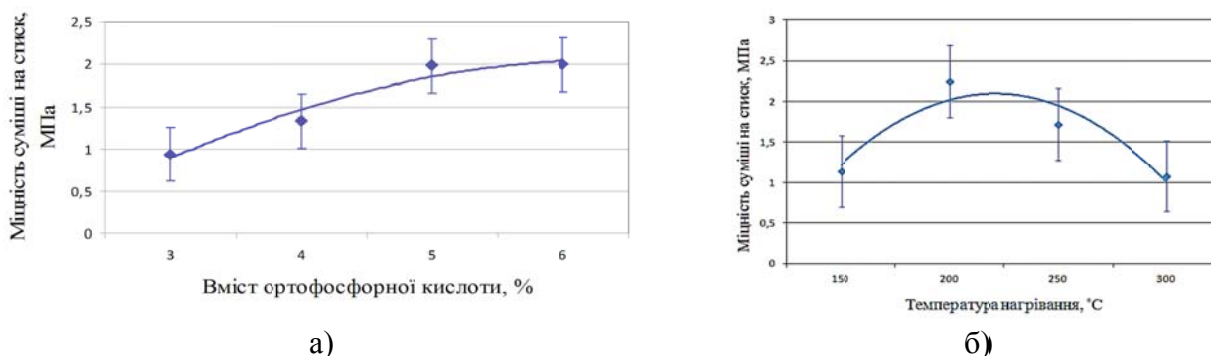
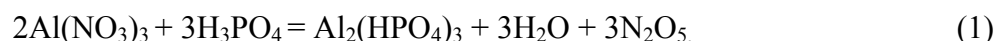


Рис. 1. Залежність міцності суміші з алюмінієвим шламом від вмісту ортофосфорної кислоти (а) та температури зміцнення (б). Масове співвідношення H_3PO_4 : шлам Al – 1 : 1

Нітрат алюмінію використовувався як водорозчинний ЗК в технологіях лиття за моделями, що витоплюються [2, 6]. Нами перевірений його зв'язувальний потенціал у стрижневій суміші наступного складу: $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ – 3 %, вода – 5 %, пісок кварцовий $3\text{K}_5\text{O}_2\text{O}_3$ – решта. Зміцнення зразків проводили 1 год в сушиллі при 200 °С. Міцність на стиск на рівні 0,6 МПа. Попередні дослідження сумішей з нітратом алюмінію і ортофосфорною кислотою показали значення у 2–3 рази вищі, тому нітрат алюмінію був вибраний як наступний алюмовмісний компонент для наших досліджень.

До складу сумішей входили: інертний наповнювач (Дніпровський кварцовий пісок $3\text{K}_5\text{O}_2\text{O}_3$), нітрат алюмінію, ортофосфорна кислота та вода. В результаті багатофакторної оптимізації методом математичного планування експерименту і оброблення результатів встановлено, що оптимальним масовим співвідношенням між основними реагентами (нітратом алюмінію і ортофосфорною кислотою) є 1:1, яке відповідає проходженню хімічної реакції:



з утворенням двозаміщеного кислого гідрофосфату алюмінію. Він і виступає зв'язувальним компонентом в готовій суміші.

Для реалізації указаної хімічної взаємодії необхідним є нагрівання, як встановлено нами, до 180 °С. При цій температурі досягається найвищий рівень міцності суміші (рис. 2, крива 2). Взаємодія відбувається і при більш низьких температурах (криві 3, 4), але інтенсивність її нижча, і результат зміцнення є незадовільним. Також очевидно, що оптимальною кількістю кислоти і нітрату алюмінію в суміші є 3–4 % – при такій кількості досягається максимальний рівень міцності.

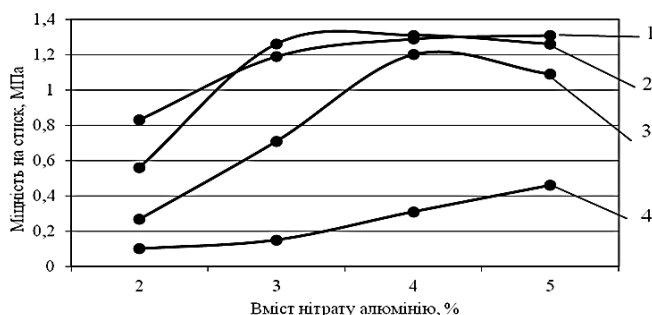


Рис. 2. Залежність міцності сумішей від вмісту нітрату алюмінію та температури: 1 – зміцнення при 210 °С; 2 – зміцнення при 180 °С; 3 – зміцнення при 150 °С; 4 – зміцнення при 120 °С

Двозаміщений кислий гідрофосфат алюмінію – біла кристалічна сіль, нерозчинна у воді. Як уже встановлено, вона наділена високими зв'язувальними властивостями, оскільки є ймовірним кінцевим продуктом у суміші з H_3PO_4 і нітратом алюмінію. Тому першим етапом дослідження стала перевірка $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$ як самостійного зв'язувального компонента.

Приготували суміш наступного складу: $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$ – 3 %, вода – 5 %, пісок кварцовий $3\text{K}_5\text{O}_2\text{O}_3$ – решта. Зразки зміцнювали при 200 °С, середнє арифметичне значення міцності 0,18 МПа. Результат нескладно пояснити, оскільки гідрофосфат алюмінію є нерозчинним у воді, через це утворення адгезійного зв'язку з наповнювачем є ускладненим. Для переведення гідрофосфату алюмінію в активну форму, яка дозволила б йому зв'язувати частинки наповнювача, його необхідно перевести в рідкий (псевдорідкий, розчинений, розплавлений тощо) стан.

Відомо [1], що алюмофосфатний зв'язувальний розчин складається якраз із кислих гідрофосфатів алюмінію, розчинених в ортофосфорній кислоті. В такому разі наш порошковий гідрофосфат має бути за певної температури розчинним у цій кислоті, внаслідок чого він має проявити свою високу зв'язувальну здатність.

Це припущення підтверджено на практиці. До складу сумішей входили: інертний наповнювач (Дніпровський кварцовий пісок $3K_5O_2O_3$), $Al_2(HPO_4)_3$, ортофосфорна кислота та вода. При нагріванні ця сіль алюмінію розчиняється у кислоті, утворюючи розчин зв'язувального компонента, який добре вкриває зерна наповнювача і зрештою зміцнюється на їх поверхні. Встановлено, що в 1 масовій частині кислоти розчиняється до 2 масових частин гідрофосфату, тому у всіх сумішах при виконанні плану експерименту дотримувались цього масового співвідношення.

Встановлено, що для досягнення необхідного рівня міцності достатнім є 3–4 % гідрофосфату алюмінію (рис. 3) і відповідно 1,5–2,0 % H_3PO_4 . В даній суміші хімічної реакції не відбувається, а кислота виступає як розчинник для готового зв'язувального компонента – гідрофосфату алюмінію. Оптимальна температура зміцнення стрижнів – 150 °С (рис. 3, крива 1).

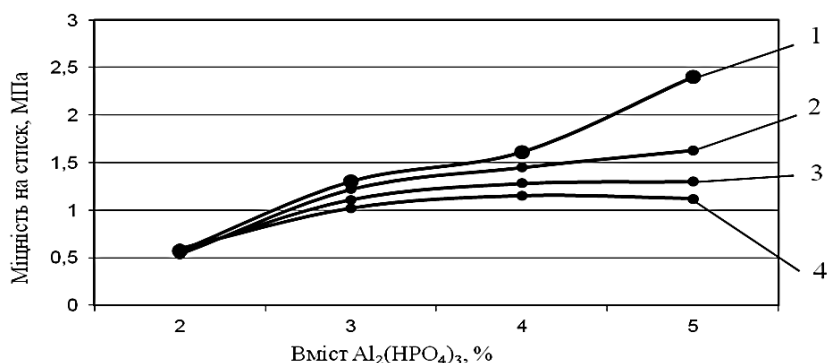


Рис. 3. Залежність міцності сумішей від вмісту гідрофосфату алюмінію і температури: 1 – зміцнення при 150 °С; 2 – зміцнення при 180 °С; 3 – зміцнення при 210 °С; 4 – зміцнення при 240 °С

Сульфат алюмінію є вже відомим зв'язувальним компонентом [2], але властивості суміші із спільним додаванням цієї солі та ортофосфорної кислоти значно вищі.

Припустивши, що внаслідок хімічної взаємодії кислоти з сіллю металу утвориться фосфат із хорошим зв'язувальним потенціалом, він може бути відокремлений та використаний надалі як самостійний зв'язувальний компонент. Таким чином, готова суміш для отримання форми або стрижня може не вміщувати як компонент ортофосфорну кислоту. Саме цей принцип реалізований у сумішах, які містять сульфат алюмінію.

Для приготування зв'язувальних композицій вихідними матеріалами були ортофосфорна кислота та сульфат алюмінію. Наважки $Al_2(SO_4)_3$ у різних масових співвідношеннях змішували у лабораторному посуді із ортофосфорною кислотою. Після попереднього перемішування їх поміщали в нагрівальну піч, де витримували при температурі 200 °С протягом 1 год для здійснення хімічної взаємодії між компонентами. Згодом наважки діставали з печі, охолоджували на повітрі і в разі наявності у них грудок або спечених конгломератів часток подрібнювали їх у лабораторній ступці. Отримані композиції просіювали через сито з розміром комірки 0,2 мм, після чого використовували для приготування сумішей.

До складу сумішей входили: інертний наповнювач (Дніпровський кварцовий пісок $3K_5O_2O_3$), готова зв'язувальна композиція, вода.

В процесі дослідження встановлено, що оптимальним масовим співвідношенням компонентів у наважці (зв'язувальній композиції) є $H_3PO_4 : Al_2(SO_4)_3 = 1 : 10$. Отже, версія щодо чисто хімічного характеру взаємодії не відповідає дійсності, тому що дане співвідношення далеке від реального стехіометричного співвідношення реагентів. Ймовірніше за все, відбувається утворення певної комплексної сполуки, хімічна і структурна формула якої нам невідомі. Але про її утворення свідчать високі значення міцності, які досягають суміші із даною зв'язувальною композицією (рис. 4).

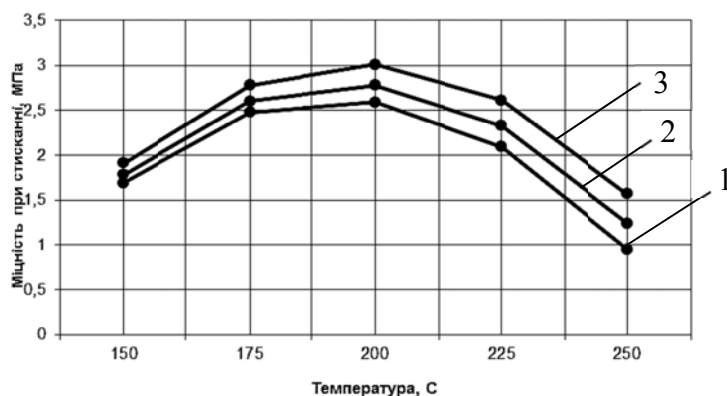


Рис. 4. Залежність міцності сумішей від температури витримки зразків та кількості зв'язувальної композиції на основі сульфату алюмінію:

1–3 % зв'язувальної композиції; 2–5 % зв'язувальної композиції; 3–7 % зв'язувальної композиції

Ортофосфорна кислота в суміш не вводиться як компонент, тому вся рідка фаза в ній представлена водою, і їй відводиться вирішальна роль у розосередженні зв'язувальної композиції по поверхнях зерен піску та створення адгезійних зв'язків. Встановлено, що кількість води менше 5 % є недостатньою для реалізації цього процесу. Це виражається у тому, що збільшення кількості зв'язувальної композиції в суміші не призводить до зростання її міцності (рис. 5, криві 1, 2). При 7 % води в суміші спостерігається традиційне зростання міцності при збільшенні відсотка зв'язувальної композиції (рис. 5, крива 3).

Оптимальна температура зміцнення стрижнів із даною зв'язувальною композицією – 200 °С.

Висока термічна стійкість фосфатів алюмінію та їх відома низька активність до залізовуглецевих розплавів обумовлюють область використання сумішей. Найбільш доцільно їх застосовувати при отриманні сталевих виливків.

Областю використання досліджених сумішей можуть бути стрижні, які виготовляють за гарячими ящиками, а також оболонкові форми, які також отримують за гарячим оснащенням. Для повноти лабораторного випробування із сумішей виготовляли як окремі стрижні, так і цілі оболонкові форми.

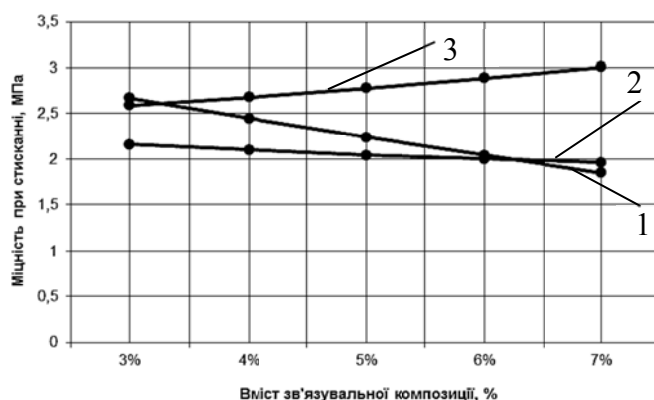


Рис. 5. Залежність міцності сумішей від кількості води та зв'язувальної композиції: 1–3 % води в суміші; 2–5 % води в суміші; 3–7 % води в суміші

Розмір порожнини оболонкової форми складає: діаметр – 80 мм, висота – 15 мм. Форми заливали вуглецевою і легованою сталлю. Склад сумішей наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Склад і властивості рекомендованих сумішей

Інд. поз.	Вміст компонентів, мас. %							Температура зміцнення, °С	Міцність на стиск, МПа
	H ₃ PO ₄	Зв'язувальна композиція з Al ₂ (SO ₄) ₃ ¹⁾	Al(NO ₃) ₃	Шлам Al	Al ₂ (HPO ₄) ₃	Вода	Пісок кварц.		
1	4–5	–	–	4–5	–	3–4	решта	220	2,0–2,4
2	3–4	–	3–4	–	–	1–2	решта	180	1,2–1,5
3	1–2	–	–	–	3–4	2–3	решта	150	1,6–2,4
4	–	5–7	–	–	–	5–7	решта	200	2,5–3,0

Примітка. До складу зв'язувальної композиції входять 10 мас. част. сульфату алюмінію, 1 мас. част. H₃PO₄; композицію витримують 1 год при 150–200 °С.

Із суміші № 1 (табл. 1) виготовлено оболонкову ливарну форму за гарячим оснащенням. Температура оснащення 220 °С, тривалість витримки 20 хв. Форму залили сталлю 20Л при підвищеній температурі 1700 °С для ускладнення умов поверхневої взаємодії форми з рідким металом. Виливок отриманий без пригару і поверхневих дефектів (рис. 6, а).



а)



б)



в)

Рис. 6. Експериментальні виливки, отримані в оболонкових формах

Із суміші № 2 виготовили аналогічну оболонкову форму, яку залили жаростійкою сталлю 30X25Ю2ТЛ при температурі 1560 °С. Ця сталь містить високий відсоток хрому, внаслідок чого може утворюватися пригар у разі фізико-хімічної взаємодії сталі з матеріалом форми. Пригару та інших поверхневих дефектів не виявлено (рис. 6, б).

Суміші № 3 використали також для оболонкової форми, яку залили сталлю 30X25Ю2ТЛ при температурі 1560 °С (рис. 6, в).

Усі суміші добре відтворюють складні елементи конфігурації поверхні виливка.

Із сумішей № 1 і 4 також виготовляли стрижні для отримання циліндричних виливків із товщиною стінки 4 мм та внутрішнім діаметром 16 мм або 22 мм (рис. 7). Ливарна форма з вертикальним роз'ємом була виготовлена в двох парних опоках і призначена для отримання восьми виливків: 5 виливків з внутрішнім діаметром 22 мм і три виливки із внутрішнім діаметром 16 мм. Форма виготовлена із сирової піщано-глинястої суміші, заливання проводили чавуном СЧ20 при 1450 °С.

Стрижні мають достатньо високу міцність для проведення операцій вилучення їх із оснащення та встановлення в форму. Отримані виливки не мають дефектів, викликаних взаємодією із компонентами ливарної форми. Вибиваються стрижні без особливих зусиль, внутрішня поверхня виливків позбавлена пригару і поверхневих недоліків (рис. 8).



Рис. 7. Блок виливків (СЧ20), отриманий з використанням стрижнів із сумішей з фосфатами алюмінію



Рис. 8. Виливок (внутрішній діаметр 22 мм) після вилучення стрижня

ВИСНОВКИ

Розроблені стрижневі суміші, які базуються на використанні зв'язувальних компонентів, що утворюються внаслідок взаємодії неорганічних сполук алюмінію із концентрованою (85 %) ортофосфорною кислотою. В залежності від використаної сполуки алюмінію (шлам, неорганічні солі) встановлені оптимальні рецептури сумішей та режими зміцнення стрижнів.

Суміші з ортофосфорною кислотою і пилом алюмінієвих шламів швидко зміцнюються при нагріванні в інтервалі 150–220 °С і мають високі фізико-механічні властивості. В цьому температурному інтервалі відбувається взаємодія кислоти із гідроксидом алюмінію та іншими його сполуками, які містяться у шламі.

При взаємодії ортофосфорної кислоти і нітрату алюмінію в масовому співвідношенні, близькому до 1 : 1, утворюється двозаміщений гідрофосфат алюмінію, який виконує роль зв'язувального компонента і дозволяє досягти міцності суміші на стиск порядку 1,5 МПа.

Введення в суміш готового двозаміщеного гідрофосфату алюмінію разом з ортофосфорною кислотою з подальшим нагріванням до 150 °С сприяє розчиненню гідрофосфату в кислоті та утворенню адгезійного зв'язку з наповнювачем, що забезпечує міцність на стиск понад 2,0 МПа.

Експериментально встановлено, що при взаємодії ортофосфорної кислоти із сульфатом алюмінію при 200 °С утворюється продукт реакції, який наділений зв'язувальною здатністю і може бути застосований як зв'язувальний компонент у стрижневих сумішах. Оптимальним складом зв'язувальної композиції слід вважати 10 мас. част. $Al_2(SO_4)_3$ на 1 мас. част. H_3PO_4 , що забезпечує найвищий рівень властивостей суміші.

Зв'язувальні компоненти, які утворюються у досліджених сумішах, мають високу термостійкість і низьку хімічну активність до залізвуглецевих розплавів. Це дозволяє отримувати виливки без пригару та інших поверхневих дефектів із чавуну, вуглецевої та легованої сталі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия / Болдин А. Н. [и др.] – М. : Машиностроение, 2006. – 507 с.
2. Формовочные материалы и смеси / Дорошенко С. П. [и др.] – К. : Вища школа, 1980. – 416 с.
3. Лютий Р. В. Формовочные и стержневые смеси с фосфатными связующими и комбинированным наполнителем, отверждаемые при нагреве / Р. В. Лютий, А. С. Кочешков, Д. В. Кеуш // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 1 (22). – С. 203–206.
4. Алюмофосфатные формовочные смеси / Лютий Р. В. [и др.] // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 4 (25). – С. 104–110.
5. Образование связующих композиций в формовочных смесях на основе ортофосфорной кислоты и солей металлов / Лютий Р. В. [и др.] // Литейное производство. – 2013. – № 5. – С. 16–19.
6. Селиванов Ю. А. Процессы формообразования на основе стабилизированного кремнезёма / Ю. А. Селиванов, Л. А. Иванова. – К. : Лыбидь, 1991. – 226 с.