

Р.В. Лютий¹, канд. техн. наук, доц., доц., e-mail: rvl2005@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6655-6499>

В.Ю. Селівьорстов², д-р техн. наук, проф., проф., e-mail: seliverstovvy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1916-625X>

В.Г. Іванов³, д-р техн. наук, доц., доц., e-mail: ivanov.valerii.g@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9216-3493>

М.М. Ямшинський¹, д-р техн. наук, доц., зав. кафедри, e-mail: yamshinskiy@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

¹Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

²Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

³Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

Зв'язувальні матеріали для ливарних форм і стрижнів: проблеми і перспективи

У статті представлено розширений аналітичний огляд більшості відомих зв'язувальних компонентів (ЗК) для виготовлення ливарних форм і стрижнів. Формувальні та стрижневі суміші складають найбільші обсяги вантажопотоків у ливарних цехах, які значною мірою перевищують обсяги виробництва литва. З екологічної точки зору, ці матеріали представляють найбільшу небезпеку, яка полягає у виділеннях шкідливих та токсичних газових продуктів під час виготовлення форм та їх заливання, а також у поступовому забрудненні екосистем відпрацьованими сумішами. Вимоги щодо підвищення якості литва, забезпечення задовільних екологічних показників, доступності та вартості матеріалів були передумовами зростання або зменшення обсягів використання різних ЗК у різні історичні періоди.

З метою порівняльного аналізу ЗК у статті наведено загальновідомий комплекс вимог до них та визначено відповідність різних матеріалів цим вимогам. Також побудовано хронологічну схему використання ЗК та їх відносної поширеності у технологіях литва з початку ХХ ст. до цього часу. Проведено ґрунтовний аналіз найбільш вагомих наукових здобутків та технологічних рішень, які супроводжували використання різних ЗК. На основі цієї інформації пояснено причини появи та усунення цих матеріалів із технологій ливарного виробництва. Зроблено прогнозні припущення щодо використання усіх відомих матеріалів протягом наступного десятиріччя. Виявлено, що основною тенденцією буде поступове витіснення піщано-смоляних сумішей та заміна їх більш екологічними, які можуть базуватися не тільки на раніше відомих, але й на створених у майбутньому нових матеріалах.

На основі проведеного аналізу встановлено наукову та технологічну проблему світового масштабу, яка полягає в необхідності створення екологічних ЗК із високим рівнем функціональних властивостей для ливарного виробництва.

Ключові слова: екологія, зв'язувальний компонент, історія використання, лігносульфонат технічний, рідке скло, синтетичні смоли, формувальні матеріали, фосфати, цемент.

Вступ. Важливими завданнями великих промислових галузей, окрім виготовлення продукції прямого призначення, є збереження природних ресурсів та захист екосистем від негативного впливу. Ливарне виробництво не є винятком, оскільки реалізація ливарних технологій потребує залучення великих обсягів основних та допоміжних матеріалів.

Найбільша кількість матеріалів витрачається на виготовлення ливарних форм. Наприклад, для їх виготовлення на час розпаду СРСР використовували щорічно близько 24 млн тонн формувальних пісків, для видобування яких щороку кар'єри забирали понад 250 га сільськогосподарських площ, а до відвалів вивозили близько 20 млн тонн відпрацьованих сумішей, що потребувало ще більших площ [1].

Формувальні матеріали використовують у різних способах лиття. Наприклад, традиційне лиття в

об'ємні піщані форми потребує від 4 до 12 тонн формувальної та стрижневої сумішей на 1 тону виливків [2–4]. Спеціальні способи (лиття в оболонкові форми; у керамічні форми; за моделями, що витоплюються; за моделями, що газифікуються; в облицьований кокіль) – від 0,5 до 1,0 тонн [5].

Формувальні матеріали, враховуючи їх значну потребу, є основною причиною погіршення екології. Забруднення відбувається через викиди до атмосфери газоподібних продуктів [6, 7], через вивезення у відвали відпрацьованих сумішей [1–3].

Постановка проблеми. Найважливішу групу формувальних матеріалів, яка визначає комплекс властивостей формувальних та стрижневих сумішей, являють собою зв'язувальні компоненти (ЗК) [2–4, 6, 8]. Найбільш екологічно небезпечними із них на сьогодні вважають синтетичні смоли. Існує поши-

рене переконання, що вони забезпечують підвищення якості литва. Але у роботі [4] указано про утворення ряду типових дефектів, а у роботі [9] – використання піщано-смоляних сумішей сприяє підвищенню вмісту розчинених в металі газів (вміст водню за експериментальними даними у чавуні зростає у 5–10 разів).

В Україні виробляють незначні обсяги ЗК. Вітчизняні розробки, наприклад бентоніт активований комплексний (БАК) [10], олігофурфурилоксисилан (ОФОС) [11, 12], лужносілікатний ЗК [13], не поширилися у промислових масштабах.

Основними виробниками матеріалів для ливарних форм є фірми Ashland, Hüttenes-Albertus, ASK Chemicals та ін., а постачальниками – «Промтехпостач» (м. Суми), «Формувальні матеріали України» (м. Краматорськ), ТОВ «Альфа» (м. Харків), ТОВ «Укрфаворит» (м. Мелітополь) та деякі інші [14]. Очевидно, що використовувати матеріали імпортного виробництва економічно не вигідно, але сьогодні ефектної заміни їм немає. До цього слід додати, що поступові екологічні обмеження та навіть заборони у ряді країн можуть сприяти подальшому поширенню їх використання в Україні.

Ливарні форми та стрижні є причиною появи наступних дефектів у виливках: пригар, гарячі тріщини, нарости, ужимини, просіки, газові раковини і пористість, неметалеві вкраплення та деякі інші [8, 15–20].

Вченими різних часів підтверджено, що ливарна форма є основним інструментом забезпечення якості литва. Результати системних досліджень фізико-хімічних та теплових процесів у формувальних сумішах із рідким склом виклали А.М. Лясс та П.А. Борсук [21], П.П. Берг, І.В. Рижков, Д.М. Кукуй, М.О. Кидалов, С.П. Дорошенко, О.І. Пономаренко [22]. Суміші з фосфатними ЗК вивчено Ю.П. Васінім [23], Є.С. Гамовим [24], І.Є. Ілларіоновим [25, 26], Л.Г. Судакасом [27]. Піщано-смоляні суміші досліджено в роботах С.С. Жуковського, С.Д. Теплякова [4, 28], Є.О. Білоброва [29], В. Тільха [30] та інших.

Мета роботи: провести ґрунтовний історичний аналіз використання зв'язувальних компонентів у складі формувальних та стрижневих сумішей, визначити основні наукові та технологічні проблеми, встановити перспективні напрями наукових досліджень формувальних матеріалів у майбутньому.

Обговорення результатів. Сучасні і раніше відомі досягнення в галузі хімії органічних та неорганічних матеріалів дають широкі можливості для вибору зв'язувальних компонентів різного призначення [3, 4, 8, 27, 31, 32]. Але для застосування у ливарних технологіях ці матеріали мають відповідати ряду специфічних жорстких вимог. У першу чергу, ця речовина має забезпечувати твердіння суміші в контакті з вогнетривким наповнювачем (кварцовим піском, цирконом, хромітом, корундом тощо) [2, 4, 8, 17, 18]. Багато розроблених для будівельної та інших галузей промисловості ефективних зв'язувальних матеріалів цього не роблять і тому не можуть бути використані для литва. По-друге, ЗК для ливарного виробництва має бути вогнетривким і хімічно інертним до розплаву. У третю чергу важливим є те, як поводить себе

ЗК після заливання. Зменшення лінійних розмірів вилівка під час його усадки має відбуватися без опору з боку форми та стрижнів. А після остаточного охолодження вилівка він має бути видалений із форми з мінімальними зусиллями, тобто суміш має під час охолодження значною мірою втрачати міцність. На жаль, переважна кількість ЗК, які мають високу вогнетривкість, зберігають високу міцність на усіх етапах роботи ливарної форми, і в деяких випадках процес вибивання вилівка потребує значних енерговитрат [2–4, 8].

Узагальнюючи накопичений досвід щодо розроблення, вивчення та використання ЗК, вимоги до них сформульовано наступним чином [2–4, 8]:

1. Висока питома міцність.
2. Необхідний рівень технологічних властивостей суміші (текучість, формувальність, ущільнювальність, липкість, живучість тощо).
3. Регульований термін твердіння.
4. Мінімальна гігроскопічність.
5. Висока газопроникність суміші.
6. Низька газотвірність суміші.
7. Висока вогнетривкість.
8. Мінімальна хімічна взаємодія з розплавом.
9. Висока податливість суміші.
10. Легка вибиваємість виливків із форм і стрижнів із виливків.
11. Довговічність (можливість повторного використання).
12. Недефіцитність і низька вартість.
13. Нетоксичність, нерадіоактивність, пожежна і екологічна безпека.

Аналіз багаторічної історії розвитку технологій ливарного виробництва, наукових досліджень та їх практичної реалізації показує, що в різні часи надавали перевагу не усім із наведених у попередньому пункті вимогам до ЗК.

Відповідність або невідповідність вимогам, здатність до удосконалення або модифікації, можливість використання у нових прогресивних технологіях – ось ті загальні характеристики, які визначали і визначають причини появи і виходу із використання ЗК. Загалом їх відомо більше 200, але зараз використовують у складі стрижневих сумішей лише деякі із них [2–4, 8].

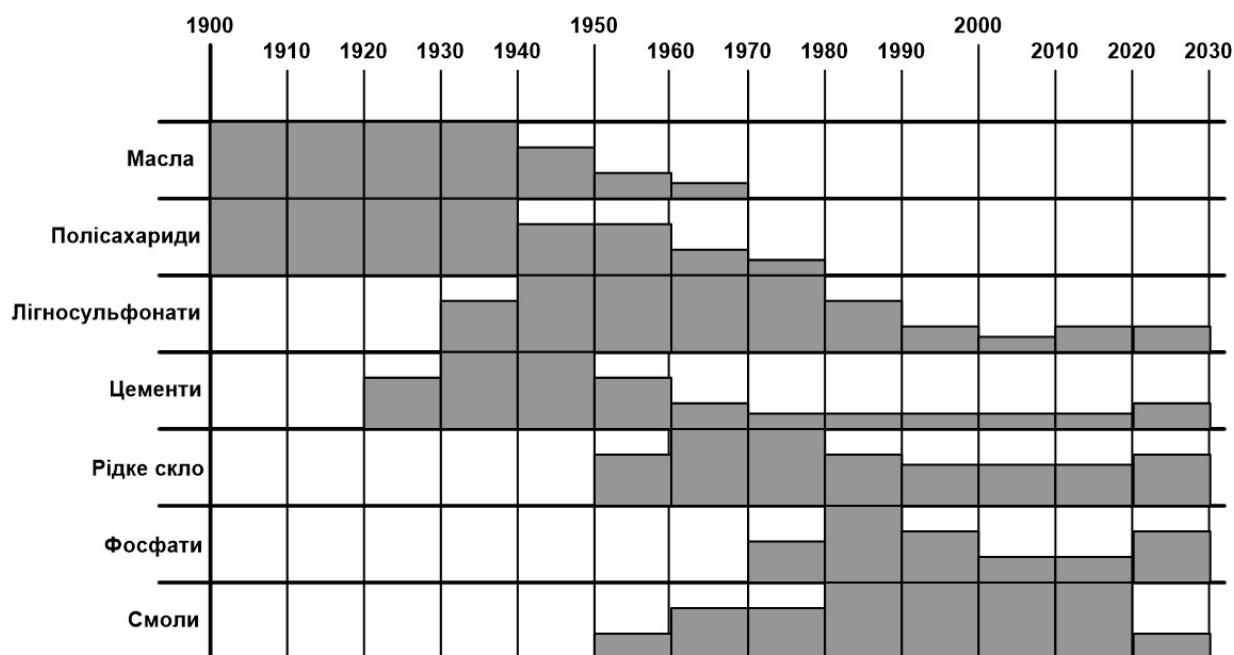
У таблиці наведено аналіз відповідності наведеним вище 13 вимогам, а на рисунку – хронологічну схему використання різних ЗК.

До стрімкого розвитку технологій хімічного синтезу ливарне виробництво використовувало матеріали, які є природною сировиною або продуктами її оброблення [2–4, 8, 18]. Наприкінці XIX ст. використовували рослинні олії (плянну, конопляну та інші) та полісахариди (патоку, декстрин). Галуззю їх використання були переважно стрижні, які тверднуть при нагріванні [2, 3]. Відомі спроби застосування масляних сумішей для виготовлення оболонкових форм – таких, які зараз виготовляють виключно за Кронінг-процесом [33].

Поступово із зростанням обсягів промислового виробництва харчові продукти стали вилучатися із нього, оскільки став відчутним їхній дефіцит. Ближче до середини XX ст. з'явилися модифіковані масляні

Загальна характеристика зв'язувальних компонентів для стрижневих сумішей

Вимоги за переліком	Відповідність зв'язувальних компонентів указаним вимогам («++» значна перевага, «+» перевага, «0» на достатньому рівні, «-» недолік, «—!» значний недолік)							
	масла	полісахариди	ЛСТ	цемент	рідке скло	фосфати	смоли	солекараміка
1	+	+	—	—	+	+	++	+
2	0	0	+	0	0	0	++	—
3	+	+	0	—	+	+	+	—
4	++	—	—	0	+	+	+	—
5	+	+	+	+	0	+	+	—
6	—	—	—	+	+	+	—	+
7	—	—	—	+	0	+	—	+
8	+	+	+	+	—	+	+	+
9	+	+	+	0	—	+	0	—
10	+	+	+	0	—!	+	+	+
11	—	—	+	—	—!	0	—	+
12	—	—	+	+	+	+	—	0
13	—	—	—	+	+	+	—!	+



Хронологічна схема використання зв'язувальних компонентів у ливарних технологіях

та полісахаридні ЗК, які отримували методами хімічного синтезу із нафтопродуктів, сланців, рослинної сировини – УСК, КО, ПТ та інші [2, 3, 8]. Головними недоліками сумішей із цими ЗК була неможливість їх холодного твердіння та великі обсяги газовиділення. Вказані причини призвели до необхідності пошуку нових матеріалів. Зараз використання масляних і полісахаридних ЗК мінімальне [4, 8], але завдяки меншій небезпеці та екологічним перевагам порівняно із іншими органічними ЗК, частково продовжують дослідження над рослинними оліями [34] та крохмальними матеріалами [35].

Лігносульфонат технічний (ЛСТ) мав історично декілька різних назв – сульфитний луг (СЛ, з 30-х рр. ХХ ст.), сульфитно-спиртова барда (до 50-х рр. ХХ ст.), сульфитно-дріжджова бражка (до 70-х рр. ХХ ст.) [2, 4]. Поступово вилучаючи із цього побічного продукту виробництва целюлози корисні та поживні речовини, вченими розроблено ряд ефективних ЗК, у тому числі синтетичних, безпосередньо для потреб ливарного

виробництва [8, 36]. Незважаючи на низьку питому міцність, низьку термічну стійкість та токсичність використовуваних затверджувачів [37], суміші з ЛСТ використовують і в сучасних цехах [4, 8]. Останніми роками з'явився ряд нових робіт щодо модифікування цього ЗК і значного покращення екологічності технологій [38].

Першим із неорганічних ЗК у ливарному виробництві (не враховуючи формувальні глини) став цемент [2, 4]. Його різновиди – портландцемент, алюмосилікатний, а також їх поєднання – вперше забезпечили усунення із технології виготовлення ливарних стрижнів операцію сушіння [2–4, 8, 36]. Недоліками цементних сумішей є тривалість процесу твердіння та висока витрата ЗК. У ряді робіт представлено результати створення ефективних каталізаторів твердіння цементних сумішей, а також модифіковані сорти високоміцних цементів [4, 32, 36]. Сукупність цих науково-технічних рішень дає змогу і сьогодні використовувати цементні суміші в індивідуальному і дрібносерійному виробництві [4], у нових спеціальних способах лиття [39]. Проте масове використання цементів припинилося з початку 60-х рр. ХХ ст.

У середині 50-х рр. із будівельної промисловості було залучено новий матеріал – рідке скло (РС), на основі якого розроблено новий на той час клас сумішей – самотвердні або холоднотвердні [2, 8]. Здатність до холодного твердіння зумовила стрімке впровадження РС у технології ливарного виробництва і витіснення його попередників. До наших днів розроблено багато різних затверджувачів і способів зміцнення сумішей з РС. Продовжує удосконалюватись і застосовуватись в Україні і за кордоном на заміну піщано-глиняним та смоляним сумішам CO_2 -процес [2, 21, 40]. Пластичні самотвердні суміші зміцнюють додаванням двокальцієвих силікатів (ферохромовий шлак і нефеліновий шлак) [2, 4, 36], активних солей металів [41]. Найбільш перспективним вважають використання рідких затверджувачів складноефірного типу у поєднанні з продуванням CO_2 та окремо [2–4, 22, 42].

Широко відомим значним недоліком сумішей із РС є вкрай утруднена вибиваємість стрижнів із виливків [2–4, 36, 43]. Вивченню цієї проблеми присвячено багато наукових робіт протягом декількох десятиріч. З метою покращення вибиваємість рідке скло піддають модифікуванню ортофосфорною кислотою та її солями [44, 45], поверхнево-активними та іншими активними речовинами [46, 47], вводять технологічні добавки у суміші [2, 13, 48, 49], регулюють модуль і кількість РС [2, 4, 50].

Незважаючи на деклароване в деяких роботах значне зниження роботи вибивання, остаточно проблему не вирішено. Навіть якщо стрижні із виливків видаляються відносно легко, суміш не піддається регенерації та повторному використанню [2–4, 8]. Вказані особливості стали причиною пошуку і розроблення нових ЗК.

Перші синтетичні смоли виникли у 50-х рр. ХХ ст. і були призначені для теплового зміцнення стрижнів. Але вже тоді вони характеризувалися високою питомою міцністю та покращували технологічні властивості сумішей.

Перший прототип смоли (М-3) застосовують і зараз [51]. Наприкінці 60-х рр. було розроблено самотвердні піщано-смоляні суміші, в тому числі із термостійкою фурановою смолою [29], а згодом – ряд високопродуктивних процесів: із рідкими затверджувачами (Pep-Set, Alpha-Set, No-Bake-Furan) та з газоподібними затверджувачами (Linocure, Cold-Box-Amin, SO_2 , Free-Radical, Beta-Set) [4, 8, 40, 52, 53]. За останніми даними, твердіння стрижня може тривати не більше 1 с [4]. Однак, необхідність нанесення на стрижні протипригарних покриттів та їх сушіння призводить до того, що тривалість технологічного циклу виготовлення таких стрижнів не набагато менша за ті, які тверднуть при нагріванні.

Разом із значним позитивом, синтетичні смоли внесли і свої недоліки у процеси формоутворення. До складу кожної смоли входять токсичні компоненти (фенол, формальдегід, бензол, толуол, ізоціанати, крезол, фурфурол тощо), які значною мірою погіршують санітарно-екологічні умови праці [2–4, 6, 7].

Обсяги виділення газів і процеси всередині стрижня при нагріванні визначаються термічною стійкістю суміші. Ця характеристика дає змогу прогнозувати можливість отримання якісного виливка [26, 28].

Перші за хронологією смоли – карбамадні – мали термічну стійкість 280–300 °С. Поступово розроблено нові типи смол, які є стійкими до 500, 600 і навіть 750 °С [2–4, 8, 52]. До складу останніх входить фуриловий спирт, який вважається найбільш небезпечним з екологічної точки зору із усіх мономерів, які застосовують для синтезу смол.

Важливу роль у вирішенні екологічних проблем має вміст смоли у суміші. Поступово він зменшувався із 3–4 % до 0,8–1,0 % сьогодні [4, 54]. Проте це лише зменшує кількість шкідливих викидів, але не усуває їх. Частка токсичних речовин, які виділяються з форм і стрижнів у вигляді газів і конденсату, за масою становить 30–40 % всіх викидів ливарного цеху. Крім цього, залишки смоли і затверджувача із відпрацьованої суміші потрапляють у ґрунт і ґрунтові води, збільшуючи показники техногенного забруднення території України [6].

Сумнівною виглядає також значна перевага смоляних сумішей за вибиваємістю. Синтетичні смоли із циклічною структурою полімера (фенольні, бензилефірні, фуранові) після термічної деструкції перетворюються на коксовий залишок [4, 8, 28], який має залишкову міцність і значною мірою ускладнює процес вибивання. Це також призводить до додаткових витрат на регенерацію, без якої процес стає збитковим [2, 7].

У сучасних умовах, зважаючи на посилення екологічного контролю, слід констатувати, що історична роль піщано-смоляних сумішей підходить до завершення, хоча успішні розробки нових смоляних ЗК продовжуються [11, 40, 55].

Фосфатні ЗК глибоко вивчалися починаючи із 40-х рр. ХХ ст. як найбільш масова група неорганічних цементів [27, 32, 56, 57]. На їхній основі розроблено клеї, замазки, композити [58], пористу кераміку [59], бетони (у тому числі вогнетривкі) [60].

Перші спроби застосувати фосфатні ЗК в ливарному виробництві датуються серединою 70-х рр. XX ст. Зважаючи на значні недоліки РС, ці матеріали швидко завоювали собі авторитет і до середини 80-х рр. їх застосовували на багатьох підприємствах, у тому числі із масовим характером виробництва. Відмічалися значна екологічність, позитивний вплив на якість поверхні виливків, вибиваємість і здатність сумішей до регенерації [2–4, 25].

Проте, наукові дослідження і практичне використання фосфатних сумішей на початку 90-х рр. значною мірою скоротились, що пов'язано із активним розвитком і поширенням синтетичних смол. На початку XXI ст. переважна більшість стрижнів виготовляється із піщано-смоляних сумішей, а на долю решти ЗК припадає не більше 10 % всього промислового обсягу [61].

Останніми роками (2015–2021) ученими Китаю, Кореї, США активно відновлено дослідження у сфері фосфатних ЗК для ливарного виробництва [62–64], зважаючи на незадовільну екологічну ситуацію. При цьому в ряді патентних праць, під впливом значного поширення синтетичних смол, термін «смола» застосовують до рідкого скла, фосфатів та інших неорганічних ЗК.

Крім наведених у таблиці і на рисунку матеріалів, відомий також ряд неорганічних ЗК, які мають обмежене використання у різних країнах світу. Науковому вивченню цих матеріалів приділено набагато менше уваги, але серед них також можуть бути такі, що мають перспективу.

Солекерамічні ЗК займають особливу нішу в технологіях лиття і не конкурують із іншими матеріалами. Їх поява у 60-х рр. XX ст. пов'язана із необхідністю відтворення складних внутрішніх порожнин виливків у методі лиття під тиском [4, 65]. Обсяги використання цих ЗК дуже малі, але стабільні [66]. Загальним недоліком процесів є складність, тривалість і енергомісткість виготовлення стрижнів, адже для їх спікання необхідна температура від 600 до 900 °C [4, 8].

Алюмінат натрію – водорозчинний ЗК, який застосовують для протипригарних покриттів і частково для стрижнів, проте він має невисоку питому міцність і потребує теплового зміцнення. У поєднанні із силікатом натрію (рідке скло), рідкими ефірами або карбонатом лужного металу може твердіти при нормальних умовах [2, 67, 68]. Очевидно, властивості цього матеріалу достатньою мірою не розкрито.

Сульфатні ЗК, в першу чергу сульфати Al і Mg, використовують у складі самотвердних водних протипригарних фарб [2, 3], а для стрижнів обов'язково необхідне теплове зміцнення [69].

Етилсилікат є провідним і поки що незамінним ЗК для технологій лиття за моделями, що витоплюються. Також його застосування поширено на лиття у керамічні форми за постійними моделями та для виготовлення разових керамічних стрижнів [2, 5].

Оксихлорид Al, оксинітрати Al та Cr досить давно використовують замість етилсилікату у технології лиття за моделями, що витоплюються, а також для виготовлення оболонкових форм та керамічних стрижнів

[8, 70]. Також у цій технології використовують кремнезолі (колоїдні розчини до 80 % SiO_2 у воді [8, 71].

З метою зниження забруднення екосистеми органічними продуктами авторами роботи [72] розроблено ЗК теплового зміцнення, який являє собою розчин відходів полістиролу в органічній рідині. Відмічається значно менша токсичність продуктів деструкції порівняно із синтетичними смолами.

Як показує проведений ґрунтовний огляд, сьогоднішній ЗК не відповідає на 100 % вимогам, сформульованим у таблиці. Тому пошук і розроблення нових ЗК у ливарному виробництві ніколи не втрачає актуальності.

Висновки та перспективи дослідження

За результатами аналізу сучасного стану вивчення і використання ЗК в останній колонці на рисунку наведено припущення щодо подальшого їх розповсюдження до 2030 року.

Резерви подальшого зниження вмісту ЗК, пришвидшення процесу виготовлення стрижнів, збільшення термічної стійкості для піщано-смоляних сумішей повністю вичерпано. Їх поступово замінять суміші з неорганічними ЗК, аналогічні або кращі за комплексом властивостей. На сьогодні таких ще не розроблено, і це є науковою задачею. Однак повністю із використання смоляні ЗК не вийдуть. Останнім часом набувають стрімкого розвитку нові технології виготовлення форм і стрижнів – так зване адитивне виробництво. Для них запроваджують виключно смоляні ЗК як такі, процесами твердіння яких легше за все керувати. Цей фактор забезпечить продовження обмеженого використання таких ЗК і в майбутньому.

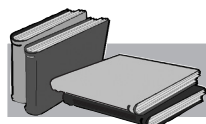
ЛСТ із усіх органічних ЗК характеризується найбільшою екологічністю, отже цей матеріал має перспективи подальшого використання.

Збільшення використання цементних ЗК можливе за умови створення нових наукових та технологічних рішень, зокрема нових матеріалів із швидким твердінням і високою питомою міцністю.

Рідке скло не вийде із використання як найбільш дешевий і доступний ЗК. У разі вирішення проблеми його вибиваємості воно може знову зайняти провідне місце у ливарних технологіях.

Фосфатні ЗК є найменш вивченими. Тому створення нових матеріалів і фізико-хімічних процесів твердіння сумішей тут найбільш очікувано. Обсяги використання цих ЗК будуть зростати.

Отже, найбільш актуальною науковою проблемою світового масштабу є створення екологічних ЗК із необхідним комплексом властивостей для ливарного виробництва. Українськими науковцями накопичено значний досвід у цій галузі, а тому вирішення цієї проблеми найближчим часом є цілком ймовірним.



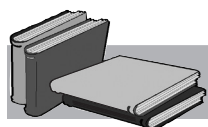
ЛІТЕРАТУРА

1. Дорошенко С.П. Современные технологические процессы производства отливок. *Теория и технология металлургических и машиностроительных процессов*. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 1994. С. 178–187.
2. Дорошенко С.П., Авдокушин В.П., Русин К., Мацашек И. Формовочные материалы и смеси. Київ: Вища школа, 1980. 416 с.
3. Дорошенко С.П. Формувальні суміші. Київ: ІЗМН, 1997. 140 с.
4. Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. и др. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия. Москва: Машиностроение, 2006. 507 с.
5. Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. Технология литейного производства: Специальные виды литья: учебник для студ. высш. учеб. заведений. Москва: Издательский центр «Академия», 2007. 352 с.
6. Solonenko L., Prokopovitch I., Repyakh S., Sukhoi K., Dmytrenko D. System analysis of modern areas of increasing environmental and sanitary hygienic safety of using cold hardening mixtures in foundry. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2019. Iss. 1 (57). P. 90–98. DOI: <http://dx.doi.org/10.15276/opu.1.57.2019.11>
7. Шадрин Н.И., Иванов В.А. Замена песчано-смоляных смесей – важный резерв улучшения санитарных условий литейных цехов в экологии окружающей среды. *Полифосфатные холоднотвердеющие смеси и отливки из высокопрочного чугуна*. 1989. С.14–17.
8. Лютий Р.В., Гурія І.М. Формувальні матеріали: Підручник. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2020. 257 с.
9. Ромашкин В.Н. Теоретические основы разработки термостойких формовочных смесей и технология их применения, обеспечивающая получение высококачественных отливок: дис. д-ра техн. наук: 05.16.04 / Ромашкин В.Н. Москва, 1991.
10. Федоров М.М. Формувальні суміші з комплексним зв'язувальним матеріалом на основі бентоніту Костянтинівського родовища: дис. канд. техн. наук: 05.16.04 / Федоров М.М. Київ, 2006.
11. Евтушенко Н.С., Шинский О.И., Пономаренко О.И. Исследование свойств регенерируемых смесей на основе ОФОС. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2013. № 4. С. 48–51.
12. 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.
13. Юрченко О.В. Формувальні та стрижневі суміші з лужно-силікатними зв'язуючими, що тверднуть в контакт з нагрітою оснасткою: дис. канд. техн. наук: 05.16.04 / Юрченко О.В. Київ, 2000.
14. Лютий Р.В., Кеуш Д.В., Пивошук А.Р., Скирденко М.В. База формувальних матеріалів України. XV Міжнародна науково-технічна конференція «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», 2017. С. 675–680.
15. Богуслаев В.А., Репях С.И., Могилащенко В.Г. и др. Литейные свойства металлов и сплавов для прецизионного литья: Учебник. Запорожжя: АО «Мотор Сич», 2016. 400 с.
16. Коровин В.А., Леушин И.О. Механизм образования и меры предотвращения дефектов чугуновых и стальных отливок. Москва: Металлургия, 2013. 112 с.
17. Могилащенко В.Г., Пономаренко О.И., Дробязко В.М. та ін. Теоретичні основи ливарного виробництва. Харків: НТУ «ХПІ», 2011. 288 с.
18. Дорошенко С.П. Взаємодія піщаної форми з виливком. Київ: НМК ВО, 1991. 76 с.
19. Дорошенко С.П., Дробязко В.Н., Ващенко К.И. Получение отливок без пригара в песчаных формах. Москва: Машиностроение, 1980. 208 с.
20. Медведев Я.И., Валисовский И.В. Технологические испытания формовочных материалов. Москва: Машиностроение, 1973. 310 с.
21. Борсук П.А., Лясс А.М. Жидкие самотвердеющие смеси. Москва: Машиностроение, 1979. 256 с.
22. Берлизова Т.В., Пономаренко О.И., Каратеев А.М., Литвинов Д.А. Влияние фурфуроликоксипропилциклокарбонатов (ФОПЦК) с различными добавками на свойства холоднотвердеющих смесей на жидком стекле. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2013. № 3 (33). С. 26–29.
23. Васин Ю.П. Теоретические основы выбора фосфатных формовочных смесей / Ю.П. Васин. Международная конференция «Феррифосфатные ХТС и технология получения на их основе высококачественных отливок», 1987. С. 9–11.
24. Гамов Е.С. Теория твердения и технология применения формовочных смесей на основе железифосфатных связующих: дис. докт. техн. наук: 05.16.04 / Гамов Е.С. Липецк, 1990. 312 с.
25. Илларионов И.Е. Металлофосфатные связующие и смеси / И.Е. Илларионов. Чебоксары: ЧГУ, 1995. 524 с.
26. Илларионов И.Е. Разработка интенсивных технологий и оптимизация составов активированных песчано-глинистых и фосфатных смесей: дис. д-ра техн. наук: 05.16.04 / Илларионов И.Е. Чебоксары, 1988. 503 с.
27. Судакас Л.Г. Фосфатные вяжущие системы. Санкт-Петербург: РИА «Квинтет», 2008. 260 с.
28. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. Москва: Машиностроение, 1989. 288 с.
29. Белобров Е.А. Из истории создания выдающихся литейных технологий. Фурановые технологии. *Библиотека литейщика*. 2014. № 6. С. 30–33.

30. Flemming E., Tilch W. Formstoffe und Formverfahren. Leipzig, Stuttgart: Deutsche Verlag fur Grundstoffindustrie, 1993. 448 p.
31. Донцова Т.А. Інноваційні неорганічні технології: Підручник. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2018. 291 с.
32. Сычев М.М. Неорганические клеи. Ленинград: Химия, 1974. 160 с.
33. Гнатуш В.А. Метали: Подорож у часі. Київ: 2019, 155 с.
34. Грузман В.М. Отверждение стержней с подсолнечным маслом продувкой горячим воздухом. *Литейное производство*. 2016. № 10. С. 7–8.
35. Пат. 2012006927 (A) Мексика, МПК В 22 С 1/26. Binder composition and method of forming foundry sand cores and molds / T.G. Garcia, S.E.L. Cedillo, H.A. Esquivel, T.A. Velasco (Мексика). № MX2012006927, заявл. 18.12.2009, опубл. 15.08.2012. 32 с.
36. Дорошенко С.П., Ващенко К.И. Наливная формовка. Київ: Вища школа, 1980. 176 с.
37. Плис С.И., Плис О.С., Давшан Г.Л., Добродеев В.В. Исследование возможности интенсификации процессов и замены соединений шестивалентного хрома в формовочных смесях на базе концентратов сульфитной барды (КСБ). *Повышение качества и надежности литых изделий*. 1976. С. 92–96.
38. Свинороев Ю.А., Гутько Ю.И., Батышев К.А., Семенов К.Г. Ускоренное отверждение смесей с техническими лигносульфонатами. *Литейное производство*. 2021. № 3. С. 9–12.
39. Дорошенко В.С. Теоретичні і технологічні основи отримання піщаних форм із сухого дисперсного наповнювача для виробництва легкових литих конструкцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.16.04 «Ливарне виробництво» / Дорошенко В.С. Київ, 2018. 37 с.
40. Попов А. Разные варианты получения стержней на оборудовании фирмы Laempe. *Литейное производство*. 2014. № 2. С. 8–13.
41. Рыжков И.В., Восковец В.Г., Толстой В.С. Жидкостекольные холоднотвердеющие смеси с микрокапсулированным отвердителем. *Библиотека литейщика*. 2013. № 7. С. 14–15.
42. Ponomarenko O., Berlizeva T., Grimzin I., Yevtushenko N., Lysenko T. Strength Properties Control of Mixtures Based on Soluble Glass with Ethersolidifiers. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 511–521. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_50
43. Комиссаров В.А., Тепляков С.Д., Соколова В.А. Состояние и перспективы разработки и использования жидкостекольных самотвердеющих смесей. *Библиотека литейщика*. 2016. № 3. С. 16–18.
44. Кукуй Д.М. Использование комплексных модификаторов жидкого стекла. Міжнародна конференція «Применение малоотходной технологии изготовления отливок из черных и цветных металлов для энергонасыщенных тракторов», 1984. С. 45–46.
45. Пат. 6139619 США, МПК В 22 С 1/16, В 22 С 1/18, В 22 С 9/02, В 22 С 9/14, С 04 В 12/00, С 04 В 12/02, С 04 В 12/04, С 04 В 28/26. Binders for cores and molds / Zaretskyi L., Manning R.L., Tse Kwok-Tuen (США). № US19960609111, заявл. 29.02.96, опубл. 31.10.00. 16 с.
46. Иванова Л.А., Наумов В.И., Чернышов Е.А., Кузнецов С.А. Свойства жидкостекольных смесей при модифицировании жидкого стекла ПАВ. *Литейное производство*. 2015. № 8. С. 6–9.
47. Репях С.И., Матюха М.В., Костинова Е.И. и др. Жидкостекольная керамическая оболочковая форма на основе плакированного кварцевого песка. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 3. С. 29–32.
48. Иванов В.Г., Кузовов А.Ф., Малый А.В. и др. Универсальная добавка для улучшения выбиваемости жидкостекольной смеси. *Литейное производство*. 2015. № 8. С. 10–12.
49. Макаревич А.П., Юрченко О.В. Влияние веществ, содержащих оксид алюминия, на выбиваемость щелочно-силикатных смесей. *Литейное производство*. 2001. № 4. С. 23–25.
50. Афонаскин А.В., Бегма В.А., Никифоров А.П., Никифоров С.А. Технология изготовления стержней из смесей с высоко-модульным жидкостекольным связующим. *Библиотека литейщика*. 2015. № 7. С. 11–12.
51. Филиппов С.Ф., Семенов К.Г., Сорокина Е.А., Батышев К.А. Свойства холоднотвердеющей смеси со связующим М-3. *Литейное производство*. 2014. № 1. С. 19–20.
52. Григорьев А.В. Материалы для изготовления опочных и безопочных разовых литейных форм и стержней по ХТС-процессу. *Литье Украины*. 2008. № 3. С. 22–31.
53. Соколов А.В., Исаева Е.И. Применение Peraset™-процесса для получения отливок ответственного назначения из алюминевых и магниевых сплавов. *Литейное производство*. 2016. № 6. С. 18–19.
54. Буданов Е.Н. Современные варианты Cold box амин-технологии и возможности ее применения на базе опыта фирмы Laempe. *Литейное производство*. 2016. № 5. С. 23–27.
55. Пономаренко О.И., Евтушенко Н.С., Колесник Е.В. Исследование прочностных свойств смоляных ХТС на хромитовых песках. *Литейное производство*. 2015. № 3. С. 5–7.
56. Kingery W.D., Bowen H.K., Uhlmann D.R. Introduction to Ceramics, 2nd Edition. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1976. 1056 p.
57. Журавлев В.Ф. Химия вяжущих веществ. Ленинград: Госхимиздат, 1951. 268 с.
58. Преображенский И.И., Шаулов А.Ю. Синтез и исследование свойств композитов на основе фосфатных связок. *Успехи в химии и химической технологии*. Том XXXII. 2018. № 2. С. 140–142.
59. Li Y., Chen L., Hong L., Ran K., Zhan Y., Chen Qi. Fabrication of porous silicon carbide ceramics at low temperature using aluminum dihydrogen phosphate as binder. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 785. P. 838–845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.114>

60. Копейкин В.А., Клементьева В.С., Красный Б.Л. Огнеупорные растворы на фосфатных связующих. Москва: Металлургия, 1986. 102 с.
61. Псимено А.К., Сипо М.М., Едер Г. Новая малотоксичная связующая система для холодного отверждения стержней PUR-COLD-BOX фирмы FURTENBACH GmbH с высокой устойчивостью к водоразбавимым противопопригарным покрытиям. *Литейщик России*. 2006. № 10. С. 7–13.
62. Пат. 108907069 Китай, МПКВ 22 С 1/18. Ferrous sulfate modified phosphate binder and preparation method thereof / Zhang Youshou, Liu Dong, Xia Lu, Ren Yanzhen, Cai Peng, Zhou Lei (Китай). № CN201810852459, заявл. 27.07.18, опубл. 30.11.18. 6 с.
63. Пат. 20180017400 Корея, МПК В 22 С 1/20, В 22 С 3/00, В 22 С 9/06. Method for preparing casting mold with high strength using ternary inorganic binder / Jung Yeon Gil, Kim Eun Hee, Woo Ta Kwan, Lee Je Hyun (Корея). № KR20160101166, заявл. 09.08.16, опубл. 21.02.18. 20 с.
64. Пат. 2014175323 США, МПК С 04 С 8/34. Thermoinsulative and thermoconductive concretes based on an alumino-phosphate binder (variants) / Alferyev Sergey D., Polyakov Valeriy A. (РФ). № US201314046967, заявл. 05.10.13, опубл. 26.06.14, Бюл. № 14. 4 с.
65. Белов В.М. Литые стали и сплавов под давлением. *Библиотека литейщика*. 2014. № 2. С. 11–14.
66. Гильманшина Т.Р., Усков И.В., Беяев С.В. и др. Изготовление соляных стержней для получения прецизионных отливок. *Литейное производство*. 2014. № 8. С. 17–20.
67. Ясюков В.В. Исследование и разработка процесса получения легкоудаляемых стержней для тонкополостных отливок: дис. канд. техн. наук: 05.16.94 / Ясюков В.В. Одесса, 1979. 198 с.
68. Романов М.К., Порхунев Р.В., Лисихин Б.М., Полякова Т.А. Стержневые смеси на основе алюминатных растворов. *Литейное производство*. 1990. № 4. С. 14.
69. Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Сайгушкина В.А. Стержневая смесь с сульфатным связующим. *Литейное производство*. 2014. № 8. С. 11–12.
70. Селиванов Ю.А., Иванова Л.А. Процессы формообразования на основе стабилизированного кремнезема. Київ: Либідь, 1991. 226 с.
71. Чулкова А.Д., Шабанова Н.А., Растегин Ю.И., Иванов В.Н. Использование кремнезоля для изготовления форм по выплавляемым моделям. *Библиотека литейщика*. 2016. № 3. С. 29–30.
72. Дан Л.А., Трофимова Л.А., Дан Е.Л., Рева И.А. Осыпаемость и остаточная прочность смесей с добавками раствора отходов пенополистирола в скипидаре. *Литейное производство*. 2015. № 5. С. 13–14.

Надійшла 01.02.2022



REFERENCES

1. Doroshenko, S.P. (1994). Modern technological processes for the production of castings. *Theory and technology of metallurgical and mechanical engineering processes*. Lipetsk: Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, pp. 178–187 [in Russian].
2. Doroshenko, S.P., Avdokushin, V.P., Rusin, K., Matsashek, I. (1980). Molding materials and mixtures. Kyiv: Vyshcha shkola, 416 p. [in Russian].
3. Doroshenko, S.P. (1997). Molding mixtures. Kyiv: IZMN, 140 p. [in Ukrainian].
4. Boldin, A.N., Davydov, N.I., Zhukovskij, S.S. et al. (2006). Foundry molding materials. Molding, core mixtures and coatings. Moscow: Mashinostroenie, 507 p. [in Russian].
5. Gini, E.Ch., Zarubin, A.M., Rybkin, V.A. (2007). Technology of foundry production: Special types of casting. Moscow: Akademiia, 352 p. [in Russian].
6. Solonenko, L., Prokopovitch, I., Repyakh, S., Sukhoi, K., Dmytrenko, D. (2019). System analysis of modern areas of increasing environmental and sanitary hygienic safety of using cold hardening mixtures in foundry. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, iss. 1 (57), pp. 90–98, doi: <http://dx.doi.org/10.15276/opu.1.57.2019.11>
7. Shadrin, N.I., Ivanov, V.A. (1989). Replacement of sand-resin mixtures is an important reserve for improving the sanitary conditions of foundries in the ecology of the environment. *Polyphosphate cold-hardening mixtures and nodular iron castings*. Lipetsk, pp. 14–17 [in Russian].
8. Liutyi, R.V., Guriya, I.M. (2020). Molding materials: Textbook. Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 257 p. [in Ukrainian].
9. Romashkin, V.N. (1991). Theoretical foundations for the development of heat-resistant molding sands and the technology of their application, ensuring the production of high-quality castings. (Extended abstract of doctor's thesis: 05.16.04). Moscow, 32 p. [in Russian].
10. Fedorov, M.M. (2006). Molding sands with a complex binder on the basis of Kostyantynivka bentonite. (Extended abstract of candidate's thesis: 05.16.04). Kyiv, 24 p. [in Ukrainian].
11. Yevtushenko, N.S., Shinsky, O.I., Ponomarenko, O.I. (2013). Investigation of the properties of regenerated mixtures based on OFOS. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*, no. 4, pp. 48–51 [in Russian].

12. Ponomarenko, O.I., Karateyev, A.M., Yevtushenko, N.S., Berezhnaya, A.V. (2010). Use of OFOS resin in foundry. *Casting processes* no. 6 (84), pp. 27–32 [in Russian].
13. Yurchenko, O.V. (2000). Molding and core mixtures with alkali silicate binder, which hardened in contact with hot tooling. (Extended abstract of candidate's thesis: 05.16.04). Kyiv, 24 p. [in Ukrainian].
14. Liutyi, R.V., Keush, D.V., Pivoschuk, A.R., Skirdenko, M.V. (2017). Base of moldind materials of Ukraine. Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow: *XV International Scientific and Practical Conference*, pp. 675–680. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute [in Ukrainian].
15. Boguslayev, V.A., Repiakh, S.I., Mogilatenko, V.G. et al. (2016). Casting properties of metals and alloys for precision casting: Textbook. Zaporizhzhia: Motor Sich, 400 p. [in Russian].
16. Korovin, V.A., Leushin, I.O. (2013). The mechanism of formation and measures to prevent defects in iron and steel castings. Moscow: Metallurgiya, 112 p. [in Russian].
17. Mogilatenko, V.G., Ponomarenko, O.I., Drobyazko, V.M. et al. (2011). Theoretical foundations of foundry production: Textbook. Kharkiv: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 288 p. [in Ukrainian].
18. Doroshenko, S.P. (1991). Interaction of sand mold with a casting. Kyiv: NMK VO, 76 p. [in Ukrainian].
19. Doroshenko, S.P., Drobyazko, V.M., Vashshenko, K.I. (1980). Obtaining non-burnt castings in sand molds. Moscow: Mashinostroenie, 208 p. [in Russian].
20. Medvedev, Ya.I., Valisovskij, I.V. (1973). Technological tests of molding materials. Moscow: Mashinostroenie, 310 p. [in Russian].
21. Borsuk, P.A., Lyass, A.M. (1979). Liquid self-hardening mixtures. Moscow: Mashinostroenie, 256 p. [in Russian].
22. Berlizeva, T.V., Ponomarenko, O.I., Karateyev, A.M., Litvinov, D.A. (2013). Influence of furfuryloxypropyl cyclocar-bonates with various additives on the properties of cold-hardening mixtures on liquid glass. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*, no. 3 (33), pp. 26–29 [in Russian].
23. Vasin, Yu.P. (1987). Theoretical foundations for choosing phosphate foundry mixtures. *Ferrous-phosphate self-hardening mixtures and technology for producing high-quality castings on their basis*. Lipetsk, pp. 9–11 [in Russian].
24. Gamov, E.S. (1990). The theory of hardening and the technology of using molding sands based on iron phosphate binders. (Doctor's thesis: 05.16.04). Lipetsk, 312 p. [in Russian].
25. Illarionov, I.E. (1995). Metal phosphate binders and mixtures. Cheboksary: Cheboksarskii Gosudarstvennyi Universitet, 524 p. [in Russian].
26. Illarionov, I.E. (1988). Development of intensive technologies and optimization of compositions of activated sand-clay and phosphate mixtures. (Doctor's thesis: 05.16.04). Cheboksary, 503 p. [in Russian].
27. Sudakas, L.G. (2008). Phosphate binder systems. Saint-Petersburg: Kvintet, 260 p. [in Russian].
28. Zhukovskij, S.S. (1989). Foundry mold strength. Moscow: Mashinostroenie, 288 p. [in Russian].
29. Belobrov, E.A. (2014). From the history of the creation of outstanding foundry technologies. Furan technologies. *Bibliotekha litejshchika*, no. 6, pp. 30–33 [in Russian].
30. Flemming, E., Tilch, W. (1993). Molding materials and foundry mold production. Leipzig, Stuttgart: Deutsche Verlag fur Grundstoffindustrie, 448 p. [in German].
31. Dontsova, T.A. (2018). Innovative inorganic technologies: Textbook. Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 291 p. [in Ukrainian].
32. Sychev, M.M. (1974). Inorganic adhesives. Leningrad: Khimiya, 160 p. [in Russian].
33. Gnatush, V.A. (2019). Metals: Time travel. Kyiv, 155 p. [in Ukrainian].
34. Gruzman, V.M. (2016). Hardening of cores with sunflower oil by hot air blowing. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 10, pp. 7–8 [in Russian].
35. Patent of Mexico no. 2012006927. IPC V22S 1/26. Binder composition and method of forming foundry sand cores and molds / T.G. Garcia, S.E.L. Cedillo, H.A. Esquivel, T.A. Velasco. Declared 18.12.2009. Published 15.08.2012, 32 p.
36. Doroshenko, S.P., Vashshenko, K.I. (1980). Bulk molding. Kyiv: Vyshcha shkola, 176 p. [in Russian].
37. Plis, S.I., Plis, O.S., Davshan, G.L., Dobrodeyev, V.V. (1976). Investigation of the possibility of intensification of processes and replacement of hexavalent chromium compounds in molding mixtures based on sulfite bard concentrate. *Improving the quality and reliability of cast products*. Moscow: Mashgiz, pp. 92–96 [in Russian].
38. Svinoroyev, Yu.A., Gut'ko, Yu.I., Batyshev, K.A., Semenov, K.G. (2021). Accelerated hardening of mixtures with technical lignosulfonates. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 3, pp. 9–12 [in Russian].
39. Doroshenko, V.S. (2018). Theoretical and technological bases of production of sand molds from dry dispersed filler for manufacturing of light-weight cast constructions. (Extended abstract of doctor's thesis: 05.16.04). Kyiv, 37 p. [in Ukrainian].
40. Popov, A. (2014). Various options for obtaining cores using Laempe equipment. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 2, pp. 8–13 [in Russian].
41. Ryzhkov, I.V., Voskovets, V.G., Tolstoj, V.S. (2013). Water glass cold-hardening mixtures with microencapsulated hardener. *Bibliotekha litejshchika*, no. 7, pp. 14–15 [in Russian].
42. Ponomarenko, O., Berlizeva, T., Grimzin, I., Yevtushenko, N., Lysenko, T. (2020). Strength Properties Control of Mixtures Based on Soluble Glass with Ethers Solidifiers. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 511–521, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_50
43. Komissarov, V.A., Teplyakov, S.D., Sokolova, V.A. (2016). State and prospects for the development and use of water glass self-hardening mixtures. *Bibliotekha litejshchika*, no. 3, pp. 16–18 [in Russian].

44. Kukuy, D.M. (1984). Using complex water glass modifiers. Application of low-waste technology for manufacturing castings from ferrous and non-ferrous metals for high-energy tractors: *International Conference*, pp. 45–46 [in Russian].
45. Patent of USA no. 6139619. IPC V22S 1/16, V22S 1/18, V22S 9/02, V22S 9/14, S 04 V 12/00, S 04 V 12/02, S 04 V 12/04, S 04 V 28/26. Binders for cores and molds / L. Zaretskyi, R.L. Manning, Tse Kwok-Tuen. Declared 29.02.96, Published 31.10.2000, 16 p.
46. Ivanova, L.A., Naumov, V.I., Chernyshov, E.A., Kuznetsov, S.A. (2015). Properties of water glass mixtures in the modification of liquid glass with surfactants. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 8, pp. 6–9 [in Russian].
47. Repyakh, S.I., Matyucha, M.V., Kostikova, E.I. et al. (2017). Water glass ceramic shell molds based on clad quartz sand. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, no. 3, pp. 29–32 [in Russian].
48. Ivanov, V.G., Kuzovov, A.F., Malij, A.V. et al. (2015). Universal additive for improving the knockout of water glass mixture. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 8, pp. 10–12 [in Russian].
49. Makarevich, A.P., Yurchenko, O.V. (2001). Influence of substances containing aluminum oxide on the knockout ability of alkaline-silicate mixtures. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 4, pp. 23–25 [in Russian].
50. Afonaskin, A.V., Begma, V.A., Nikiforov, A.P., Nikiforov, S.A. (2015). Technology for the production of cores from mixtures with a high-modulus water glass binder. *Bibliotekha litejshchika*, no. 7, pp. 11–12 [in Russian].
51. Filippov, S.F., Semenov, K.G., Sorokina, E.A., Batyshev, K.A. (2014). Properties of a cold-hardening mixture with a binder "M-3". *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 1, pp. 19–20 [in Russian].
52. Grigoryev, A.V. (2008). Materials for the manufacture of flask and flaskless one-time casting molds and cores according to the self-hardening process. *Litjo Ukrainy*, no. 3, pp. 22–31 [in Russian].
53. Sokolov, A.V., Isayeva, E.I. (2016). Application of the Pepset process for the production of critical castings from aluminum and magnesium alloys. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 1, pp. 18–19 [in Russian].
54. Budanov, E.N. (2016). Modern options of Cold-box-amin technology and the possibilities of its application based on the experience of Laempe. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 5, pp. 23–27 [in Russian].
55. Ponomarenko, O.I., Yevtushenko, N.S., Kolesnik, E.V. (2015). Investigation of the strength properties of resin self-hardening mixtures on chromite sands. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 3, pp. 5–7. [in Russian].
56. Kingery, W.D., Bowen, H.K., Uhlmann, D.R. (1976). Introduction to Ceramics: 2nd Edition. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1056 p.
57. Zhuravlyov, V.F. (1951). Chemistry of binding materials. Leningrad: Goskhimizdat, 268 p. [in Russian].
58. Preobrazhenskij, I.I., Shaulov, A.Yu. (2018). Synthesis and study of the properties of composites based on phosphate bonds. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, Vol. XXXII, no. 2, pp. 140–142 [in Russian].
59. Li, Y., Chen, L., Hong L., Ran, K., Zhan, Y., Chen, Qi. (2019). Fabrication of porous silicon carbide ceramics at low temperature using aluminum dihydrogen phosphate as binder. *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 785, pp. 838–845, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.114>
60. Kopejkin, V.A., Klementyeva, V.S., Krasnij, B.L. (1986). Refractory solutions based on phosphate binders. Moscow: Metallurgiya, 102 p. [in Russian].
61. Psimeno, A.K., Sipo, M.M., Eder, G. (2006). New low-toxicity bonding system for cold curing of rods PUR-COLD-BOX from FURTENBACH GmbH with high resistance to water-borne non-stick coatings. *Litejshchik Rossii*, no. 10, pp. 7–13 [in Russian].
62. Patent of China no. 108907069. IPS V22S 1/18. Ferrous sulfate modified phosphate binder and preparation method thereof / Zhang Youshou, Liu Dong, Xia Lu, Ren Yanzhen, Cai Peng, Zhou Lei. Declared 27.07.18. Published 30.11.18, 6 p. [in Chinese].
63. Patent of Korea no. 20180017400. IPS V22S 1/20, V22S 3/00, V22S 9/06. Method of production of foundry mold with a high strength with using a triple inorganic binder / Jan Eon Gil, Kim Eun Hi, Li Ge Hun. Declared 09.08.16. Published 21.02.18, 20 p. [in Korean].
64. Patent of USA no. 2014175323. IPS S 04 S 8/34. Thermoinsulative and thermoconductive concretes based on an aluminophosphate binder (variants) / S.D. Alferyev, V.A. Polyakov. Declared 05.10.13. Published 26.06.14, 4 p.
65. Belov, V.M. (2014). Die casting of steel and alloys. *Bibliotekha litejshchika*, no. 2, pp. 11–14 [in Russian].
66. Gil'manshina, T.R., Uskov, I.V., Belyayev, S.V. et al. (2014). Making of salt cores for precision castings. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 8, pp. 17–20 [in Russian].
67. Yasukov, V.V. (1979). Research and development of the process of obtaining easily removable cores for thin-cavity castings. (Candidate's thesis: 05.16.04). Odessa, 198 p. [in Russian].
68. Romanov, M.K., Porhunov, R.V., Lisihin, B.M., Polyakova, T.A. (1990). Core mixtures based on aluminate solutions. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 4, p. 14 [in Russian].
69. Evstigneyev, A.I., Dmirtiyev, E.A., Sajgushkina, V.A. (2014). Core mixture with sulphate binder. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 8, pp. 11–12 [in Russian].
70. Selivanov, Yu.A., Ivanova, L.A. (1991). Molding processes based on stabilized silica. Kyiv: Lybid', 226 p. [in Russian].
71. Chulkova, A.D., Shabanova, N.A., Rastegin, Yu.I., Ivanov, V.N. (2016). The use of silica ash for the manufacture of molds for investment casting. *Bibliotekha litejshchika*, no. 3, pp. 29–30 [in Russian].
72. Dan, L.A., Trofimova, L.A., Dan, E.L., Reva, I.A. (2015). Fallability and residual strength of mixtures with additives of expanded polystyrene waste solution in turpentine. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 5, pp. 13–14 [in Russian].

Received 01.02.2022

Summary

R.V. Liutyi¹, PhD (Engin.), Docent, Associate Professor, e-mail: rvl2005@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6655-6499>

V.Yu. Selivorstov², Dr. Sci. (Engin.), full Professor, Professor, e-mail: seliverstovvy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1916-625X>

V.H. Ivanov³, Dr. Sci. (Engin.), Docent, Associate Professor, e-mail: ivanov.valerii.g@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9216-3493>

M.M. Yamshinskij¹, Dr. Sci. (Engin.), Docent, Department Chair, yamshinskiy@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

²Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro, Ukraine)

³National University "Zaporizhzhia Polytechnic" (Zaporizhzhia, Ukraine)

Binder materials for foundry molds and cores: problems and perspectives

The article presents an extended analytical review of most of the known binders for the manufacture of molds and cores. Molding and core mixtures account for the largest volumes of cargo flows in foundries. They significantly exceed the volume of casting production. From an environmental perspective, these materials pose the greatest danger. The danger lies in the release of harmful and toxic gaseous products during the manufacture of molds and during their filling, and in the gradual contamination of ecosystems with spent mixtures. Requirements to improve the quality of castings, ensure satisfactory environmental performance, availability and cost of materials have been prerequisites for increasing or decreasing the use of various binders in certain historical periods.

For the purpose of comparative analysis of binders, the article presents a well-known set of requirements for them and determines the compliance of various materials with these requirements. A chronological scheme of the use of binders and their relative prevalence in casting technologies from the early twentieth century to the present has also been constructed. A thorough analysis of the most important scientific achievements and technological solutions is carried out. They were accompanied by the use of various appropriate binders. Based on this information, the reasons for the emergence and elimination of these materials from foundry technologies are explained. Predictive assumptions have been made about the use of all known materials over the next decade. It was found that the main trend will be the gradual displacement of sand-resin mixtures and their replacement by more environmentally friendly ones, which can be based not only on previously known, but also on new materials created in the future.

On the basis of the conducted analysis the scientific and technological problem of world scale is established. It consists in the need to create ecological binders with a high level of functional properties for foundry production.

Keywords

Ecology, binder, history of use, technical lignosulfonate, water glass, synthetic resin, molding materials, phosphate, cement.