

<https://doi.org/10.15407/plit2022.01.045>

УДК 621.744

В. С. Дорошенко, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.;
e-mail: doro552gmail.com; ORCID 0000-0002-0070-5663

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ПРО ОПТИМІЗАЦІЮ ЛИТИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ЗВ'ЯЗУВАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙ ДЛЯ 3D-ДРУКУ ЛИВАРНИХ ФОРМ

Аддитивні чи 3D-технології сьогодні все більше застосовують в ливарному виробництві для пошарового друку як ливарних моделей, так і форм, чи виливків. Так звана «тиха революція» 3D-технологій скорочує термін впровадження у виробництво нової номенклатури литва без паперових документів з цифрових файлів за комп'ютерними програмами. Технології 3D-друку здатні усунути вузькі місця в ланцюжках поставок, підвищуючи рівень локалізації виробництва. Але для реалізації цього потенціалу розробники рішень з 3D-друку мають підвищити швидкість і економічність виробництва на базі цієї технології; створити мережу сервісного обслуговування; орієнтуватися на «м'яку» інтеграцію рішень для 3-D друку. Описані приклади литих біонічних конструкцій показують значні можливості комп'ютерної оптимізації конструкцій виливків у поєднанні з 3D-друком ливарних форм. Критика аддитивних технологій показує потребу їх здешевлення, зокрема, за рахунок застосування недорогих формувальних матеріалів бажано з неорганічними зв'язувальними. Для цього запропоновано адаптацію для адитивної формовки давно застосовуваних сумішей традиційної формовки. Склади сумішей для 3D-друку мають широкий діапазон регулювання і підґрунтя для створення недорогих сумішей за аналогами, що застосовують сьогодні в традиційних ливарних цехах. Доповнення відомих способів зміцнення формувальної суміші методами адитивного формування за допомогою хімічно швидкотвердних зв'язувальних композицій дозволить задіяти потенціал технології ХТС, досвід реалізації когезійно-адгезійного зв'язувального механізму зміцнення піщаних сумішей в умовах швидкоплинної тонкошарової формовки. Створений спосіб виготовлення піщаних зразків 3D-друком на стандартному обладнанні дозволить випробувати і порівняти нові адитивно створені суміші з показниками сумішей традиційного ливарництва, що нині застосовуються.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D-технології, піщана форма, формовка, холодно-твердна суміш, біонічні конструкції, оптимізація конструкцій.

Аддитивні чи 3D-технології сьогодні все більше застосовують в ливарному виробництві для пошарового друку як ливарних моделей (разових чи багаторазових), так і форм, чи виливків. Так звана «тиха революція» 3D-технологій, серед ряду переваг, скорочує термін впровадження у виробництва нової номенклатури литва за рахунок 3D-друку ливарної оснастки і виливків без паперових документів, зокрема, на модельно-формувальну оснастку, а саме: з цифрових файлів за комп'ютерними програмами. Разом з 3D-друком ці програми здатні до оптиміза-

ції (згідно експлуатаційних чи заданих властивостей) литих конструкцій, що неминує веде до природоподібних конструкцій, бо еволюція природи вже відібрала структури і форми, що найбільш ресурсоефективно підкорюють простір. Зокрема, біонічні (подібні до природних) конструкції, мовби долаючи гравітацію чи опір середовища, часто «ростуть» знизу вгору («до сонця» чи від опори), якраз в тому напрямку, в якому йде друкування на 3D-принтері.

В якості прикладу застосування програм проектування легкового конструкцій на рис. 1, а показано 3D-друковану опору із алюмінієвого сплаву. Нова її конструкція від компанії Airbus Defense and Space (Великобританія) [1] економить метал та скорочує час виготовлення, а більша жорсткість дає кращу точність наведення для прикріплених антен, зокрема при їх розміщенні в космосі. Наступний приклад – це 3D-друк ажурної легкоплавкої моделі, за якою вилито корпус дрона з магнієвого сплаву (рис. 1, б) [2] компанією Aristo Cast Inc., яка є членом Американського ливарного товариства AFS.

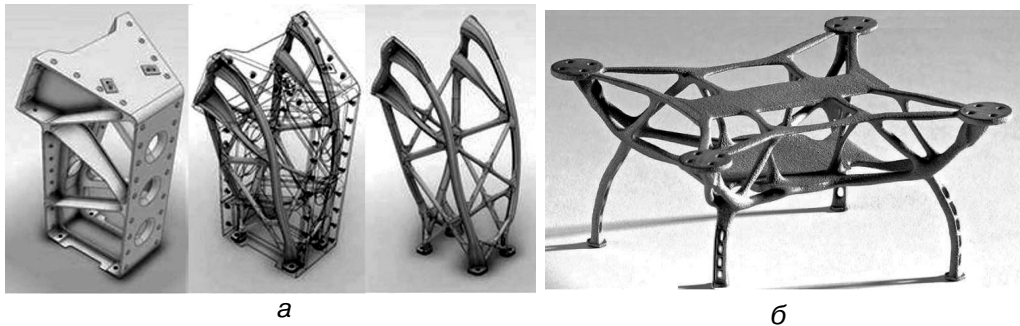


Рис. 1. Приклади конструкції опори при зміні її на легковому і біонічну (а) та тонкостінного литого корпусу дрона (б)

На рис. 2 показано схему [3] послідовності операцій з оптимізації конструкції деталі кронштейна 1 для її виготовлення методом лиття, що включає: моделювання в ній напружень 2 та вірогідних усадкових дефектів 3, а також зображення моделі 4, проектування ливниково-живильної системи 5, 3D-друк піщаної форми 6, заливання 7 форми і отримання виливка 8 і готової деталі 9.

Прикладом серйозної уваги до досліджень і розвитку ливарних адитивних технологій є суттєва доля фінансування AFS адитивної теми – 22 % (рис. 3) [4].

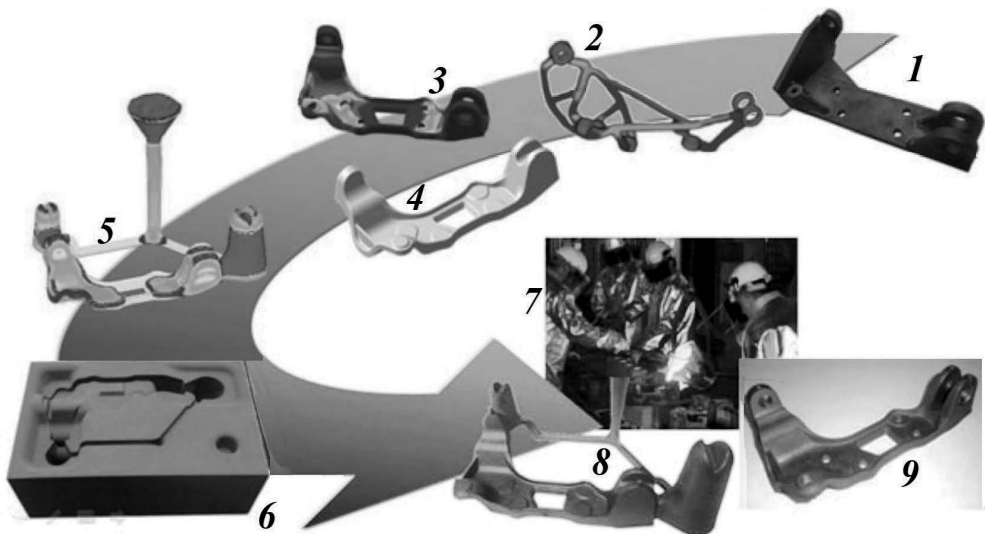


Рис. 2. Порядок операцій з оптимізації конструкції деталі кронштейна з 3D-друком піщаної форми

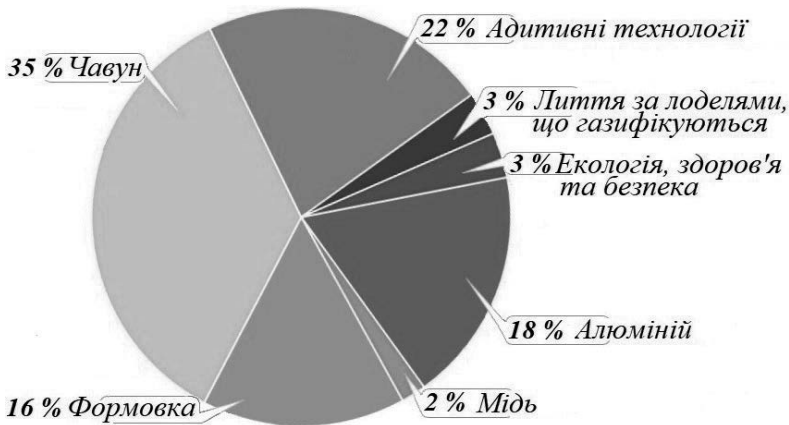


Рис. 3. Напрями науково-технічних досліджень, що фінансуються AFS у 2020-21 рр

Аналізуючи тренди впровадження 3D-друку в промисловості і можливості вирішення нею проблем з поставками заготовок, Нареш Шанкер, головний директор з технологій Xerox, відзначає [5], що в 2020 р. майже 75 % топ-менеджерів вбачили серйозні збої в ланцюжках таких поставок, які під впливом пандемії залишають виробників і споживачів уразливими для зовнішніх ризиків. 3D-друк дасть можливість виробляти більше деталей на місцях, що знижує залежність підприємств від зовнішніх поставок компонентів і дозволяє продовжувати випуск продукції, навіть якщо виникли логістичні труднощі. Опитування серед керівників промисловості в 2017 р. показало, що 81% респондентів використовують технології адитивного виробництва (3D-друку), однак тільки 29 % – для серійного випуску деталей [5]. Якщо адитивні способи стабілізують виробництво, знижують ризики в логістиці поставок, чому багато виробників не наважуються використовувати весь потенціал цієї технології?

Причина 1. 3D-друк дорогий і повільний [5]. 3D-друк виявився в центрі уваги під час пандемії COVID-19 і супутніх економічних потрясінь. Компанії – від галузевих лідерів до представників малого бізнесу, які працюють не вдома, – активно використовували адитивне виробництво, щоб швидко виготовляти засоби боротьби з пандемією, такі, як маски для обличчя, апарати штучної вентиляції легенів (конструкції цих апаратів, як правило, включають більше десяти металевих виливків під тиском) і зонд-тампони для відбору проб. Багато хто віддає належне адитивному виробництву, оцінюючи його допомогу в боротьбі з пандемією, і деякі вважають це переломним моментом у розвитку індустрії 3D-друку. Однак є й ті, хто дотримується давнього стереотипу про те, що ця технологія робить виробництво повільніше і дорожче.

Казати так про 3D-друк в цілому – несправедливо і неправильно, проте в цьому є частка істини. 3D-друк металом – вдала ілюстрація розриву між очікуваннями і реальністю. Є кілька методів 3D-друку металом. Провідні виробники використовують ті, які базуються на спіканні, плавленні або напиленні металевого порошку. За цією технологією деталі створюються із сплавлених разом крупинок металу. Однак використовувати металевий порошок дорого. В роботі з ним виробничі бригади потребують додаткових заходів безпеки. Крім того, багато часу і грошей іде на процеси наступної обробки: на видалення залишків порошку, термічну і механічну обробку.

Причина 2. Технологія не готова до промислового застосування [5]. Десять років тому здавалося, що ми на порозі «3D-революції». На жаль, існуючі тоді технології не були готові виправдати завищені очікування, від впливу яких індустрія досі не до кінця оговталася. Виробники, що на цій хвилі одними з перших спробували впровадити 3D-друк, розчарувалися, бо тоді технологія була незрілою. Тому зараз вони не зважуються знову ступити на цей шлях. Що зробити, щоб 3D-друк закріпився на виробництві? Щоб впливати на виробництво не лише в області створення прототипів, індустрія 3D-друку повинна вирішити кілька важливих завдань.

1. Зробити адитивне виробництво більш швидким і доступним, що особливо важливо в сегменті 3D-друку металом, який в найближчій перспективі буде в центрі уваги виробників. Треба знайти більш безпечні альтернативи металевому порошку – наприклад, рідкий метал. Нові технології, які в майбутньому скоротять обсяг постобробки, зіграють вирішальну роль в прискоренні циклу і зниженні витрат. Це зробить 3D-друк привабливішим для виробників.

2. Розгорнути просту і зручну глобальну мережу сервісного обслуговування. Великі підприємства важкої промисловості, автомобільної та аерокосмічної галузі більше інших виграють при впровадженні 3D-друку. Однак при цьому для них неприйнятні довгі простоти через збої в роботі обладнання. У таких компаній надто великі потреби, щоб покладатися на дрібні сервісні центри. Тому великі підприємства будуть розраховувати на такий же високий рівень обслуговування, як у більш досвідчених постачальників в інших сферах.

3. Ставити перед собою реалістичні цілі. Більшість підприємств не прагнуть повністю перебудувати виробничу лінію і ланцюжки поставок, орієнтуючись на «м'яку» інтеграцію рішень для 3D-друку, а не радикальну перебудову процесів.

3D-друк не лише оптимізує ланцюжки поставок заготовок, сприяючи переносу частини виробництва на місце, але і дозволить виробникам скоротити вуглецевий слід завдяки більш економному застосуванню матеріалів і зменшенню транспортних витрат при доставці готових деталей. Індустрія 3D-друку має величезний потенціал для завоювання міцних позицій в промисловості, а розробники рішень для 3D-друку повинні показати, що вони здатні стати надійними партнерами, які зміцнюють надійність поставок і стабілізують ритм виробництва [5].

З урахуванням вище описаних критики і умов застосування 3D-друку, очевидно, що для ливарного виробництва на даному етапі найбільш перспективним і вигідним за витратами є впровадження цієї технології в процеси виготовлення ливарних піщаних форм за схемою (рис. 2), на відміну від друку металом. Зокрема, друкування форм і стрижнів методом Binder Jetting (Ink-Jet) – пошарове склеювання композитного порошку (зазвичай на основі кварцового піску) зв'язувальним компонентом, дозволяє друкувати досить великі вироби і, на відміну від інших технологій 3D-друку, не вимагає друку підтримуючих опор. Якість цього друку набагато вища, ніж друку пластиками (ABS, PLA і т.п.). Основними виробниками обладнання для друку піщаних форм є компанії ExOne, 3D Systems (США) і Voxeljet (Німеччина) з робочими камерами принтерів до 4000x2000x1000 мм і товщиною шару порядку 0,3 мм. До позитивних сторін технології Binder Jetting також відносять дешевизну порошкових матеріалів; високу швидкість друку; високу роздільну здатність, яка дозволяє створювати вироби з дрібними деталями; відсутність виділень шкідливих речовин, що дозволяє використовувати принтери в будь-якому офісі чи будинку без додаткових вентиляційних систем.

Процес друкування переважно з застосуванням на принтерах зазначених та інших компаній друкованих головок шириною близько 300 мм (однієї або декількох за один прохід) супроводжується змочуванням і фільтрацією рідким компонентом шарів сипкого формувального матеріалу, що по черзі наносять, як правило, з утворенням зв'язувальних композицій, які тверднуть в результаті хімічних реакцій, які також можуть прискорювати зовнішнім впливом. Цей технологічний напрям починався з введенням у формувальний пісок матеріалу, який твердне при взаємодії з водою, наприклад, напівводного гіпсу і (чи) портландцементу. Однак зазначені суміші мають ряд обмежень при виготовленні форм. Гіпсові суміші мають вогнетривкість, зазвичай достатню лише для лиття кольорових сплавів, і з невисокою газопроникністю, а обидві суміші (хоч і з недорогих матеріалів), особливо цементні, – повільне тверднення, що звужує сферу їх застосування.

Процес зв'язування частинок формувальної суміші (створення міцності) прийнято розглядати як скріплення твердих тіл рідкою речовиною (зазвичай з подальшим твердненням), коли міцність зв'язування залежить від співвідношення сил когезії

і адгезії і їх абсолютних величин. Технологія виготовлення форм з сумішей, що зміцнюються в контакт з оснасткою, – холоднотверднучих сумішей (ХТС) або, що тверднуть під впливом хімічних реагентів, налічує десятки зв'язувальних композицій [6], придатних для пошарового отримання піщаних форм.

У наших роботах [7–9] запропоновано і випробувано деякі варіанти способів переміщення розпилювачів для пошарового друку, а також композицій з кількох інгредієнтів, що спочатку окремо входять в склади сипких та рідких матеріалів, а потім взаємодіють один з одним при їх з'єднанні і фільтрації рідким компонентом сипкого піщаного матеріалу форми. При цьому один з пари реагентів був зв'язувальним формувальною сумішю, а інший – затверджувачем або каталізатором твердіння цього зв'язувального; якщо один вводили в рідку композицію для розпилення, то інший – в сипку (піщану), чи навпаки. Затверджувач вступає в пряму або непряму хімічну взаємодію зі зв'язувальним, а каталізатор забезпечує затвердіння зв'язувального зазвичай в результаті зміни рН середовища. Серед хімічних і фізико-хімічних процесів твердіння при змочуванні і фільтрації рідким компонентом поверхневого шару піщаної форми з утворенням зв'язувальної композиції, що твердне, з пари реагентів переважають процеси поліконденсації і полімеризації, що реалізують переважно хімічний тип зв'язку між частинками формувального піску [6].

У зв'язку з необхідністю досить швидкого забезпечення несучої здатності нарощуваних при друкуванні шарів стінки форми за відсутності опори на тверду модель (наявність якої характерна для традиційної формовки в ливарному виробництві) вибирали склади реагентів для найбільш швидкого твердіння суміші (з мінімальним індукційним періодом). При цьому розглядали такі пари реагентів, які розробники ХТС раніше забракували через малу живучість суміші і критикували їх за цей недолік, патентуючи нові, відмінні від них суміші.

Частота нанесення шарів 3D-принтерами в автоматичному режимі, зазвичай, практично на порядок вище подачі нових порцій піщаної суміші в опоку при виготовленні традиційних піщаних форм. Вибір реагентів і їх кількість в формувальній суміші обґрунтували тою умовою, що тривалість створення міцної стінки форми або стрижня, що виготовляли, повинна складати не більше тривалості всього процесу друкування, що, в свою чергу, скорочує цикл формування. Інакше, при повільному твердінні, як показали наші дослідження, в порожнині форми від стельових частин форми можливе відділення піщинок або шарів незв'язаної суміші і їх осипання при видаленні готових форми або стрижня з робочої камери принтера, що призведе до браку форми. Крім того, швидке тужавлення (схоплювання) і твердіння піщаних шарів сприяє підвищенню точності піщаного виробу без неконтрольованого поширення (надмірної фільтрації) зв'язувального, що також залежить від його точного дозування друкувальними головками і, в цілому, веде до скорочення кількості зв'язувальних реагентів та формувальних сумішей без зайвого потовщення стінки форми і при зниженні потреби додаткової сушки готового виробу.

Таким чином, для 3D-друку рекомендується адаптація найбільш зручних для цього самотвердних сумішей традиційних процесів лиття з урахуванням специфіки введення рідкої частини композиції в насипний шар і перспективи регулювання швидкості твердіння при адитивній формовці з оптимальною витратою матеріалів і без зниження якості форм та виливків. Тоді процес друкування оптимізованих програмою переважно тонкостінних форм і стрижнів дозволить відразу, після закінчення твердіння останніх шарів, видалити отримані піщані вироби з камери принтера і передати її на такі операції, як фарбування, сушка і збірка форм. У цій статті з досвіду застосування традиційних формувальних сумішей розглянуто три види найбільш вживаних для них зв'язувальних композицій з метою аналізу можливої їх адаптації до 3D-друку.

У першому прикладі реагентів, що тверднуть, в якості зв'язувального використовували рідке скло (содове), яке випускається з модулем 2,61–3,0 – низькомодульне і 3,01–3,5 – високомодульне в рідкому вигляді і густиною 1360–1500 кг / м³ (ГОСТ 13078–81) і, оче-

видно, є другим після глини за обсягом застосування зв'язувальним компонентом для формування. У ливарному виробництві частіше застосовують рідке скло з модулем 2,0–3,1. Однак в нашому випадку при виборі для нього порошкового затверджувача враховували, що чим вище модуль рідкого скла, тим вище його ступінь полімеризації і швидкість затвердіння. Затвердіння піщано-рідкоскляних сумішей найчастіше виконують такими порошкоподібними матеріалами, як ферохромовий шлак, нефеліновий шлак та ін. Ферохромовий шлак – саморозсипний шлак феросплавного виробництва, що містить більше 70 % двокальцієвого силікату має типовий склад (%): CaO 48–54; SiO_2 20–30; Al_2O_3 4–8; MgO 7–12; Cr_2O_3 2–12; FeO 0,1–2. Склад основних компонентів побічного продукту виробництва глинозему з нефелінових руд – нефелінового шламу (%): CaO 54–58; SiO_2 28–32; Al_2O_3 2–4; Fe_2O_3 2–4; $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 2–3 [6, 10].

Серед інших порошкових реагентів-затверджувачів рідкого скла, що вводяться в формувальну суміш, відомі кремній, феросиліцій (75 %-ний), силікофторид кальцію та ін. А такі матеріали, як гідроксид і хлорид кальцію, силікофторид натрію та ін. можуть використовуватися як в порошку в піщаній суміші, так і у водному розчині [6, 10] рідкої композиції для розпилення. Порошкові затверджувачі можна вводити в піщаний наповнювач, що наноситься шарами. В наших експериментах з введенням порошкового рідкого скла в пісок його вводили в кількості 2–10 % від маси піску, а відповідну кількість затверджувача для нього вводили в рідку композицію. Для останнього випадку придатний сухий концентрат для швидкісного приготування рідкого скла, зокрема, виробництва ЗАТ «Урал ВІМ», м. Челябінськ (по ТУ 5743-001-31178039-2001) у вигляді порошкоподібного матеріалу (мелена силікат-брила). Він постачається в мішках для швидкого приготування водних розчинів безпосередньо на місці споживання шляхом додавання до дозованої кількості концентрату рідкого скла необхідної кількості води. Цей концентрат виробник контролює за вмістом діоксиду кремнію (SiO_2), оксидів лужних елементів (Na_2O , K_2O), їх співвідношення, що характеризується, як силікатний модуль М, що зручно для розрахунків рідких композицій. При адитивному виробництві перевагу слід віддавати калійвмістному рідкому склу, тому що самотвердні суміші з його добавкою мають підвищену швидкість тверднення.

При виборі наступної пари реагентів в якості зв'язувального випробували лігносульфонати (ЛСТ – побічні продукти при виробництві целюлози з деревини сульфитним способом) [6]. Вони займають в ливарному виробництві четверте місце після глини, рідкого скла і синтетичних смол, будучи дешевими і недефіцитними органічними водорозчинними зв'язувальними, що забезпечують хорошу вибивальність форм, в тому числі з ХТС. Згідно ГОСТ 13 183-83 ЛСТ виробляються марки А (рідкі, містять сухих речовин не менше 47 %, густиною – не менше 1230 кг/м³) і марки Т (тверді, більше 76 % сухих речовин); рН 20 %-го розчину ЛСТ - не менше 4,4. Для ХТС (з ЛСТ), що затверджується хромовим або марганцевим ангідридом, чи іншими сполуками з шестивалентним хромом, найбільше підходять ЛСТ з кальцієвою основою. ЛСТ застосовують в традиційних формувальних сумішах в кількості 2–5 % (іноді до 8 %) в поєднанні з глиною 2–3 %, або природними формувальними глинистими пісками. Для самотвердіння сумішей з ЛСТ використовують такі добавки: хромовий ангідрид CrO_3 , біхромати натрію і калію і персульфат амонію в кількості від 0,2 до 0,7 % від маси суміші. Якщо хромовий ангідрид вводять в рідку композицію, то використовують водний розчин з густиною не вище 1,3 г/см³, тоді ЛСТ у вигляді порошку вводять в піщані шари. А якщо ЛСТ вводять в рідку композицію, то їх зазвичай розбавляють водою до щільності не вище 1,17–1,20 г/см³, а порошкоподібний отверджувач поміщають в піщані насипні шари [6].

Третю групу реагентів для ХТС традиційної формовки представляють такі, в яких використовується синтетична смола і затверджувач - кислота [6, 10]. Ці суміші завжди були найбільш дорогими, оскільки на 1 т виливків тільки на зв'язувальний компонент може витратитися близько \$500. Твердіння синтетичних смол обумовлено переведенням полімерів з низькою молекулярною масою в полімери з високою молекулярною масою, і в залежності від структури одержуваних полімерів, цей про-

цес називають полімеризацією або поліконденсацією. Основна перевага сумішей зі смолами, в порівнянні із сумішами з іншими зв'язувальними, полягає в їх високій міцності при малій (1–2,5 %) витраті зв'язувального, однак такі суміші, як правило, вимагають якісних пісків.

Для адитивної формовки досить перспективні водорозчинні феноло-формальдегідні смоли, наприклад, СФЖ-30-13 і водоемульсійна смола СФЖ-301. Починати дослідження можна з їх введення в рідку композицію в кількості не нижче 2,5 %, а в піщаній суміші мати до 3% глини або застосовувати недорогі глинисті піски. І для досягнення отвердження до суміші додають каталізатор ПТСК в кількості 0,6–1,5 % [6]. Глина при цьому адсорбує низькомолекулярні фракції зв'язувального, в результаті чого підвищується міцність піщаних шарів.

В якості застосовуваних до останнього часу каталізаторів затвердіння синтетичних смол поширення набули бензосульфокислота (БСК) і ортофосфорна кислота (ОК). БСК, $C_6H_5SO_3H$ поставляється у вигляді кристалічного продукту з відносною молекулярною масою 158,18 і добре розчиняється в воді. Технічна БСК складається з моносльфокислоти бензолу - 98,4–98,6 %; вільної H_2SO_4 - 1,2–1,4 % і бензолу - не більше 0,2 % (ТУ6-14-25-74). Каталізаторами затвердіння групи карбамідних смол, які частіше всього використовуються у вигляді рідкої суспензії, служать органічні (щавлева, лимонна, оцтова) і неорганічні (сірчана, соляна, фосфорна) кислоти, а також деякі солі (хлористий амоній, хлористий цинк). Щавлева кислота може поставлятися в порошку (для водного розчину рекомендований 10 % розчин), а паратолуолсульфокислота (ПТСК, $C_7H_8O_3S \cdot H_2O$) поставляється у вигляді кристалів без запаху з розчинністю у воді 67 г / 100 мл води.

У вигляді водних розчинів зазвичай використовують БСК з щільністю до 1,20–1,25 г/см³ в якості каталізатора для затвердіння феноло-формальдегідних, фурило-феноло-формальдегідних та ін. смол, а ОК зі щільністю до 1,20–1,55 г / см³ – для затвердіння смол карбамідофуранового класу. Для прискорення затвердіння піщано-смоляних плакованих сумішей, або сумішей з порошкоподібною смолою, використовують водний розчин соляної кислоти, а також каталізатори ЛСФ, АМ та ін. Каталізатор ЛСФ – концентрат сульфітно-спиртової барди, підкисленої ортофосфорної кислотою, застосовується для затвердіння смоли КФ-90. Для введення в піщану суміш в порошкоподібному вигляді придатні, згідно довідника [11], смоли виробництва ВАТ «Уралхімпласт» (м. Нижній Тагіл Свердловської обл.) по ГОСТ 18694-80, зокрема, СФ-011, СФ-012, СФ-015, СФ-015М та ін., зв'язувальні фенольні порошкові типу СФП-ОИЛ по ТУ 6-05-1370-90 (ВАТ «Карболіт», м. Орехово-Зуєво), або за ТУ 2257-111-05015227-2006, а також деякі тверді епоксидні смоли згідно ГОСТ 10587-84 і смола феноло-формальдегідна тверда СФЖ-303 згідно ГОСТ 20907-75 (ВАТ «Карболіт»). Таким чином, для затвердіння піщаної суміші є різноманіття вибору водорозчинних смол і їх затверджувачів з реагентів, що випускаються промисловістю, і можливістю введення їх в рідку композицію та в шари піщаної суміші, або, як показано нижче, лише в шари суміші.

Розглянемо ряд прикладів з найбільш недорогими за вартістю і поширеними зв'язувальними композиціями. Досить цікава пропозиція: для 3D-друку по сипкому шару застосовувати чисту воду, якщо сипку піщану суміш приготувати з порошковими добавками двох реагентів – зв'язувальної речовини і затверджувача, між якими без контакту з водою хімічної реакції не відбувається, але при змочуванні (з друкувальної головки) шару піщаної суміші іде реакція між зв'язувальним і затверджувачем з твердненням шару суміші. Наприклад, можливий друк при змочуванні такого складу сухої сипкої формувальної суміші (згідно роботи [9]): формувальний кварцовий пісок – 82–93 %; сухий порошкоподібний концентрат рідкого скла содового (з модулем 2,6–3,3) 3–7 %; шлак феросплавного виробництва 4–11 %. Експерименти показали, що тривалість твердіння шару суміші від моменту змочування водою до початку набуття достатньої міцності суміші для переміщення піщаного виробу та подальших операцій становила близько 10 хв.

Крім того, доцільна адаптація для 3D-друку такого варіанту CO_2 -процесу з сухою формувальною сумішшю наступного складу: кварцовий пісок 94,7–95,8 %; порошкоподібний концентрат рідкого скла 2,4–3,5 %; гідрокарбонат натрію 1,0 %, в побуті званий харчовою содою (наприклад, виробництва БАТ «Лисичанська сода», ГОСТ 2156–76); а також лимонна кислота 0,8 % ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, наприклад, виробництва БАТ «Смілянський цукровий завод», ГОСТ 3652–69). Два останніх порошки постачається у вигляді тонкого помелу, їх і одержуваний в результаті реакції в суміші цитрат натрію використовують як харчові добавки E500ii і E330, що характеризує їх екологічну безпечність. В реакції $\text{NaHCO}_3 + \text{H}_3(\text{C}_5\text{H}_5\text{O}_7) \rightarrow \text{Na}_3(\text{C}_5\text{H}_5\text{O}_7) + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$ води в числі речовин, що вступають в реакцію, нема, але без неї реакція не відбувається [9]. Моль CO_2 , що виділився в цій реакції, бере участь у відомій реакції, на якій заснований CO_2 -процес, і затверджує рідке скло в кількості одного моля. При виконанні експериментів для прискорення розчинення компонентів і реакції між ними в формувальній суміші застосовували для змочування нагріту воду. При нагріванні вище 60°C гідрокарбонат натрію розкладається: $2\text{NaHCO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$. Отриманий нормальний карбонат реагує з лимонною кислотою аналогічно кислому карбонату з виділенням вуглекислого газу.

Крім того, твердіння рідкого скла в формувальній суміші може відбуватися за рахунок збільшення його силікатного модуля шляхом нейтралізації частини або всього лугу, який міститься в рідкому склі, що досягається його взаємодією з кислотою, в тому числі, твердою [12]. При цьому отриманий з рідкого скла кремнегель має підвищену водостійкість. Для реалізації такого механізму твердіння в ряді експериментів з виготовлення форм для дрібних виливків додатково вводили в зазначену піщану суміш лимонну кислоту в кількості 0,2–1,0 %. В описаних вище реакціях виділяється вода, яка разом з водою, що подається з друкованої головки, розчинить розглянуті компоненти формувальної суміші. У лабораторних умовах тривалість твердіння шару суміші від початку його зволоження до утворення достатньої твердості без ознак обсіпання для перенесення на підсушування піщаних зразків суміші масою до 1 кг складала 7–10 хв.

У наступному варіанті в якості зв'язувального для сухої піщаної суміші використовували ЛСТ марки Т в такому складі сипкої формувальної суміші: кварцовий пісок 91–98 %, порошок ЛСТ тонкого помелу 3–8 %, і в якості затверджувача – хромовий ангідрид в порошку тонкого помелу 0,4–1,0 %. Утворення піщаної кірки з насипного шару суміші товщиною до 1 мм відбувалося через 18–24 хв після початку змочування цього шару водою. Характерною властивістю взаємодії між ЛСТ і CrO_3 , що відслідковується на підтвердження процесу поліконденсації, була екзотермічна реакція, яка нагрівала насипний шар суміші, що затвердів, як піщана пластинка. Екзотермічна реакція також властива твердненню кристалогідратів (гіпс, цемент, металофосфати) і ряду інших зв'язувальних. Підвищення температури прискорює процеси розчинення сухих компонентів рідиною, що подається з друкованої головки, і в більшості випадків прискорює твердіння суміші. А також в ряді способів полімеризацію зв'язувального інтенсифікують опроміненням поверхні верхнього шару суміші інфрачервоним або ультрафіолетовим випромінюванням тощо, при цьому такі опромінювачі закріплюють поруч з друкованою головкою і переміщують маніпулятором разом з нею над цією поверхнею.

В ряді експериментів порошкові реагенти перед введенням їх в суміші додатково розмелювали до необхідного ступеня дисперсності, а кількості інгредієнтів вибирали залежно від необхідної швидкості тверднення піщаних шарів форми. Отримані при цьому пластинки або оболонки видаляли з навколишньої незатверділої суміші, їх розпилювали, контролювали якість поверхні і маніпуляційну міцність, при якій ці оболонки можна транспортувати в складі форми або стрижня. Час тверднення пластинок чи оболонок після змочування рідкою композицією тонких шарів формувальної суміші визначали приладом (типовим для випробовування міри твердіння будівельних матеріалів) «голка Віка» із голкою діаметром 1,1 мм, за ступенем схоплювання (тужавлення) і продовження твердіння піщаних сумішей.

При регулюванні твердіння піщаних форм пошарового виготовлення доцільне відпрацювання процесу поєднання впливу на рідке скло в суміші декількома затверджувачами або прискорювачами твердіння. Адже при виготовленні піщаних форм з рідким склом (як і з деякими іншими зв'язувальними), його можна затверджувати газом, кислотою, з'єднаннями кальцію і іншими затверджувачами, ініціюючи таку реакцію змочуванням друкованою головкою піщаної поверхні нарощуваної пошарово форми. При випробуванні різних складів сумішей з імітацією подання рідини на піщаний шар друкувальною головкою заповнення піщаних пор реагентом, що переноситься водою, і схоплювання (тужавлення) суміші нерідко відбувається насамперед з поверхні піщаної стінки [13], на відміну від традиційних ХТС, які приготовлені в змішувачі і тверднуть в об'ємі всієї форми. Тому формувальна суміш, зразки якої швидко утворюють поверхневу кірку на повітрі, може бути перспективна для адитивної формовки.

Описані особливості твердіння сприятимуть розширенню гнучкості (варіативності) формувальної адитивної технології з її доопрацюванням в різній мірі для виготовлення кожної конкретної групи виливків. Приготування сухої сипкої формувальної суміші з введенням в неї більше двох реагентів і ряду технологічних добавок є аналогічним виробництву десятків видів багатокomпонентних сухих будівельних сумішей, значний вибір яких зараз представлено в будівельних маркетах і великотоннажне виробництво яких продовжує зростати, включаючи широке поширення фасування-пакування і постачання їх до місця вжитку для замішування з водою і використання в готовому пластичному чи рідкоплинному вигляді.

Для випробування (згідно діючих вітчизняних стандартів для традиційної формовки) на механічну міцність та газопроникність формувальних і стрижневих сумішей, одержуваних пошарово адитивним формуванням, нами розроблено спосіб виготовлення за лабораторних умов зразків таким формуванням без дорогих автоматичних установок [14]. Це дозволяє перевірити рецепти або склади розроблених нових, або застосовуваних в традиційній формовці сумішей та адаптованих для адитивного формування, і випробувати на стандартних лабораторних приладах чи установках характеристики адитивно виготовлених зразків, порівнюючи їх характеристики з десятками відомих сумішей традиційної формовки.

Підводячи підсумки. Описані вище окремі приклади литих біонічних металоконструкцій показують, які значні можливості розкриває комп'ютерна оптимізація конструкцій виливків [15] у поєднанні з адитивним виготовленням ливарних форм, недавній приклад також є в роботі [16]. Наведена критика адитивних технологій показує потребу їх здешевлення, зокрема, за рахунок застосування недорогих формувальних матеріалів бажано з неорганічними зв'язувальними. Для цього доцільні дослідження в напрямку адаптації для адитивного формування давно відпрацьованих і застосовуваних сумішей традиційної формовки.

Початковий аналіз цієї теми, включаючи патенти, показує, що варіанти складів сумішей для 3D-друку мають досить широкий діапазон регулювання і підґрунтя для створення і випробування, зокрема, недорогих сумішей за аналогами, що застосовуються сьогодні в традиційних ливарних цехах. Взаємне доповнення відомих способів створення міцності (зміцнення) формувальної суміші і методів адитивного формування за допомогою хімічно швидкотвердних зв'язувальних композицій дозволить задіяти наявний значний науково-технічний потенціал нинішньої технології ХТС, зокрема, накопичений досвід реалізації когезійно-адгезійного зв'язувального механізму зміцнення піщаних сумішей в нових умовах швидкоплинного тонкошарового формоутворення. Створений спосіб виготовлення піщаних зразків [14] не вимагає експлуатації будь-якого нового обладнання, крім стандартного з діючих процесів формування та сумішоприготування, дозволить випробувати і порівняти нові адитивно утворені суміші з табличними показниками застосовуваних нині сумішей традиційного ливарництва, що нині застосовуються.

Ілюструючи перспективи розвитку лиття біонічних конструкцій в поєднанні з 3D-друком, зазначимо таке. На сайтах окремих компаній замовник вже може роз-

містити онлайн креслення свого виливка (деталі), а програма – тут же показати оптимізовані варіанти конструкції цього виливка, рекомендації до матеріалу, вартості, часу його виготовлення залежно від серійності тощо. Мало того, визначивши або задавши точки докладання зовнішніх сил чи силових полів, комп'ютер «зможе» заповнити ці точки металоконструкцією, що адекватно реагує або протидіє цим силам (деяка аналогія є на рис. 2, п. 2), та навіть запропонувати новітні металеві матеріали, які, в тому числі, самовільно змінюють свої структуру і властивості, зокрема, зміцнюючись у міру зносу або зростання в них напружень, «зшиваючись» голками мартенситу деформації у місцях на межі руйнування, що описано для ізотермічно загартованих виливків із залізовуглецевих сплавів [17]. Це схоже на те, як у магазині одягу покупець за допомогою програми доповненої реальності може на тут же зробленому своєму фото чи відео в повний зріст на моніторі побачити себе в тому одязі, що він вибрав кліками на комп'ютері, порівняти віртуально свій вид в різних костюмах з рекомендаціями щодо оптимальних кольорів, ціни, новизни, матеріалу, сезону, розмірів.

Для ливарно-металургійних підприємств на шляху до створення цифрової технології культури, що покликана докорінно змінити виробництво, розглянуті у статті елементи цифровізації представляють собою певні кроки і умови підтримки конкурентоспроможності виробництва, які, в тому числі, сприяють досягненню його кліматичної нейтральності. Адже сьогодні успіх супроводжує конкурентна перевага в цифрових і «зелених» технологіях.

Список літератури

- 1 Airbus Defence and Space Optimising Components Using 3D Printing for New Eurostar E3000 Satellite Platforms. 1.06.2015. URL: <https://additivemanufacturing.com/tag/airbus-defence-and-space/>.
- 2 Jiten Shah. Mini drone cast with help of 3D printed patterns. Casting Source. 2021. Mar/Apr. P. 18–19.
- 3 Bernard A., Thompson M.K., Moroni G., Vaneker T., Pei E., Barlier C. (2019) Functional, Technical and Economical Requirements Integration for Additive Manufacturing Design Education. In: Pei E., Monzón M., Bernard A. (Eds.) Additive Manufacturing – Developments in Training and Education. Springer, Cham. P. 171–185. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76084-1_12
- 4 AFS-Funded Research. URL: <https://www.afsinc.org/research>.
- 5 Нареш Шанкер. Что не так с 3D печатью сейчас и как она поможет бизнесу в будущем. 06.11.2020. URL: <https://rb.ru/opinion/3D-print-problems/>.
- 6 Дорошенко С. П. и др. Формовочные материалы и смеси. К. Вища школа, 1990, 415 с.
- 7 Дорошенко В. С. О послойном печатании песчаной формы с дифференцированной прочностью. Литейное производство. 2015. № 4. С. 19–25.
- 8 Дорошенко В. С. Оптимизация гранулометрического состава песчаных смесей для фильтрационной формовки. Процессы литья. 2015. № 1. С. 47–53.
- 9 Дорошенко В. С. Варианты твердения формовочных смесей при литье по ледяным моделям. Литейное производство. 2016. № 3. С. 29–34.
- 10 Патент 80509 Україна, МПК В22С 9/04, 9/12, 7/02, 1/16. Спосіб виготовлення оболонкової форми по легкоплавкій моделі / В. С. Дорошенко, О. І. Шинський, А. А. Стрюченко. Опубл. 2013. Бюл. 11.
- 11 Специальные способы литья: Справочник. Под ред. В.А. Ефимова. М.: Машиностроение, 1991, с. 169–171
- 12 Корнеев В. И., Данилов В. В. Растворимое и жидкое стекло. Спб.: Стройиздат. 1996, с. 107–109.
- 13 Лютий Р. В., Дорошенко В. С., Тишковець М. В. Дослідження процесів тверднення стрижневих сумішей з фосфатними зв'язувальними компонентами, в тому числі для адитивного формування. Метал і лиття України. 2021. № 1. С. 61–69

- 14 Патент 148770 Україна, МПК8 В22С 9/02, В22С 15/02. Спосіб адитивного виробництва зразка піщаної формувальної чи стрижневої суміші / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко, Р. В. Лютий та ін. Опубл. 2021. Бюл. № 37.
- 15 Дорошенко В. С. Аддитивные технологии в литейных процессах. Конструкцию и материал отливки оптимизирует компьютер. Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: мат. XIV Всеукраїнської науково-практ. конф., Київ, 19.04.2016. К.: НТУУ «КПІ», 2016. С. 331–341.
- 16 Дорошенко В. С. Литье по газифицируемым моделям в вакуумируемые формы из сыпучего песка. Металлургия машиностроения. 2021. № 2. С. 42–4
- 17 Дорошенко В. С. О литье защитных и износостойких конструкций из изотермически закаленного высокопрочного чугуна. Ч. 1, 2. Литейное производство. 2020. № 5. С. 28–31, № 7. С. 21–25.

Надійшла 05.10.2021

References

- 1 Airbus Defence and Space Optimising Components Using 3D Printing for New Eurostar E3000 Satellite Platforms. 1.06.2015. URL: <https://additivemanufacturing.com/tag/airbus-defence-and-space/>. [in English].
- 2 Jiten Shah. (2021). Mini drone cast with help of 3D printed patterns. Casting Source. 2021. Mar/Apr. P. 18–19. [in English].
- 3 Bernard A., Thompson M. K., Moroni G., Vaneker T., Pei E., Barlier C. (2019) Functional, Technical and Economical Requirements Integration for Additive Manufacturing Design Education. In: Pei E., Monz n M., Bernard A. (Eds.) Additive Manufacturing – Developments in Training and Education. Springer, Cham. P. 171–185. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76084-1_12 [in English].
- 4 AFS-Funded Research. URL: <https://www.afsinc.org/research>. [in English]
- 5 Naresh Shanker. What is wrong with 3D printing now and how it will help businesses in the future. 06.11.2020. URL: <https://rb.ru/opinion/3D-print-problems/>. [in Russian].
- 6 Doroshenko S. P. et al. (1990). Molding materials and mixtures. Kyiv. Vishcha shkola, 1990, 415 p. [in Russian].
- 7 Doroshenko V. S. (2015). On layer-by-layer printing of sandy form with differentiated strength. Litejnoe proizvodstvo. No. 4. P. 19–25. [in Russian].
- 8 Doroshenko V. S. (2015). Optimization of the granulometric composition of sand mixtures for filtration molding. Protsessyi litya. No. 1. P. 47–53. [in Russian].
- 9 Doroshenko V. S. (2016). Variants of hardening of molding mixtures when casting on ice patterns. Liteynoe proizvodstvo. No. 3. P. 29–34. [in Russian].
- 10 Patent 80509 of Ukraine, MPK B22C 9/04, 9/12, 7/02, 1/16. Method of making a shell mold according to a low-mettme pattern / V. S. Dorosemko, J. I. Shinskiy, A. A. Ctyuchenko. Opubl. 2013. Byul. 11. [in Ukrainian].
- 11 Special methods of casting: Handbook. Edit by V. A. Efimova. M.: Mashinostroenie, 1991, p. 169–171. [in Russian].
- 12 Korneev V. I., Danilov V. V. (1996). Soluble and liquid glass. Spb.: Stroyizdat. p. 107–109. [in Russian].
- 13 Lyutiy R. V., Doroshenko V. S., Tishkovets M. V. (2021). Investigation of curing processes of rod mixtures with phosphate binder components, including for additive formation. Metal littyta Ukrayini. No. 1. P. 61–69. [in Ukrainian].
- 14 Patent 148770 of Ukraine, MPK B22 9/22, B22C 15/02, Method of additive production of a sample of sand molding or rod mixture / O. Y. Shinskiy, V. S. Doroshenko, R. V. Lyutiy ta in. Opubl. 2021. Byul. 37. [in Ukrainian].

- 15 Doroshenko V. S. (2016). Additive technologies in casting processes. The design and material of the casting are optimized by a computer. *Spetsialna metalurgiya: vchora, сьогодні, завтра: mat. XIV Vseukrayinskoyi naukovoprakt. konf.*, Kyiv, 19.04.2016. K.: NTUU «KPI», 2016. P. 331–341. [in Russian].
- 16 Doroshenko V. S. (2021). Casting on gasified models into evacuated molds from loose sand. *Metallurgiya mashinostroeniya*. No. 2. P. 42–45. [in Russian].
- 17 Doroshenko V. S. (2020). About casting of protective and wear-resistant structures from isothermally hardened high-strength cast iron. *Ch. 1, 2. Liteynoe proizvodstvo*. No. 5. P. 28–31, No. 7. P. 21–25. [in Russian].

Received 05.10.2021

References

V. S. Doroshenko, *Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist*;
e-mail: doro55v@gmail.com; ORCID 0000-0002-0070-5663

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

ABOUT OPTIMIZATION OF CAST CONSTRUCTIONS AND BINDING COMPOSITIONS FOR 3D-PRINTING OF MOLDS

Additive or 3D-technologies today are increasingly used in foundry production for layer printing of both foundry models and molds or metal castings. The so-called “silent revolution” of 3D technologies shortens the time of introduction in the production of a new nomenclature of Lithuanian without paper documents from digital files by computer programs. 3D-printing technologies are able to eliminate bottlenecks in supply chains, increasing the level of localization of production. But to realize this potential, developers of 3D-printing solutions must increase the speed and efficiency of production based on this technology; create a service network; focus on “soft” integration of solutions for 3D-printing. The described examples of cast bionic structures show significant opportunities for computer optimization of casting structures in combination with 3D-printing of molds. Criticism of additive technologies shows the need to reduce their cost, in particular, through the use of inexpensive molding materials, preferably with inorganic binders. For this purpose, adaptation for additive molding of long-used mixtures of traditional molding is proposed. Compositions of mixtures for 3D-printing have a wide range of regulation and a basis for creation of inexpensive mixes on analogs applied today in traditional foundries. Complementing the known methods of hardening the molding mixture by additive molding methods using chemically fast-setting binders will use the potential of HTS technology, experience in implementing cohesive-adhesive binder mechanism to strengthen sand mixtures in the conditions of fast thin-layer molding. The created method of making sand samples by 3D-printing on standard equipment will allow to test and compare new additively created mixtures with the indicators of currently used mixtures of traditional foundry.

Keywords: additive production, 3D-technologies, sand mold, molding, cold-solid mixture, bionic constructions, design optimization.