

<https://doi.org/10.15407/plit2022.04.042>

УДК 669.13: 621.74.045

О. Й. Шинський, д-р техн. наук, зав. відділу

О. В. Михнян, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;

e-mail: mixnyan@ukr.net; ORCID 0000-0003-3210-4173

О. В. Нейма, наук. співроб.; e-mail: neima_alex@ukr.net;

ORCID 0000-0001-5438-7253

В. С. Дорошенко, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.;

e-mail: doro55v@gmail.com, ORCID 0000-0002-0070-5663

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

АДАПТАЦІЯ ПРОЦЕСУ АДИТИВНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ГАЗИФІКАЦІЇ ЇХ В ПІЩАНІЙ ФОРМІ ПРИ ЗАЛИВАННІ МЕТАЛУ, А ТАКОЖ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ПІНОПОЛІСТИРОЛУ

Описано технологічний метод з галузі ливарного виробництва, що поєднує адитивне виробництво (АВ) разових ливарних полімерних моделей з утилізацією відходів пінополістиролу (ППС). Його створено для переходу на спосіб лиття за моделями, що газифікуються, від нинішнього способу лиття за друкованими моделями, що випалюються. Останній спосіб застосовують тому, що сучасні друковані моделі мають високу густину і зольність, це погіршує якість металевих виливків при застосуванні їх для ЛГМ. Утилізація ППС дає екологічний ефект, а АВ моделей є прикладом поширення цифровізації і автоматизації ливарного виробництва. Описано приклади утилізації ППС, приклади виливків за випалюваними адитивно виготовленими моделями та виявлений в робочих порожнинах форм зольний залишок, що складається з вуглецю, після випалювання таких моделей. Показано приклади друку моделей з комірчастою їх серцевиною і вентиляційним каналом, невдалий приклад лиття алюмінію способом ЛГМ у вакуумованій піщаній формі, а також приклад 3D-принтера для друку з застосуванням подрібненого пластику або пластикових гранул. Розроблений спосіб друку разових ливарних моделей для газифікації у піщаній ливарній формі відповідає тенденції поширення АВ у ливарному виробництві. Якщо питома вага друкованої моделі надто висока, то застосовують нові способи ЛГМ з виведенням надлишку газів від газифікації моделі крізь вентиляційний канал у моделі і трубчастий випор за межі форми і з окисленням цих газів, зокрема за розробленим нами способом. Така нейтралізація газоподібних відходів при ЛГМ слушно доповнює утилізацію твердих відходів ППС, як сировини для АВ ливарних моделей. Водночас ці способи дають синергійний ефект щодо екологічного збереження довкілля, покращення умов праці ливарників та зниження собівартості литої продукції разом з підвищенням її якості.

Ключові слова: лиття за моделями, що газифікуються; 3D-друк; адитивне виробництво; разові моделі; моделі, що випалюються; пінополістирол; утилізація відходів полімерів.

Галузі виробництва вбирають в себе нові знання та прагнуть втілити їх в нову вартість на товари і послуги, швидко пропонуючи їх ринку. Цьому сприяють цифрові інновації, що формують новий вигляд, зокрема, ливарного виробництва. В даній статті розглядаються варіанти застосування методу адитивного виробництва (AB) як складової новітніх цифрових 3D-технологій для утилізації полімерних відходів, зокрема шляхом виготовлення ливарних моделей методом AB із відходів пінополістиролу (ППС, EPS). Такі відходи у світі є крупнотонажними з урахуванням відходів упаковки і від теплоізоляційних матеріалів в будівництві тощо, переробка яких дає позитивний екологічний ефект і відповідає завданням численних природоохоронних програм та захисту довкілля.

Проведемо аналіз інформації щодо важливості переробки відходів ППС і окремих способів такої переробки, а також передумов застосування AB для виготовлення разових моделей для виробництва точних виливків. Такі моделі видаляються з ливарної форми випалюванням, розчиненням, витоплюванням чи газифікацією у ливарній формі розплавом металу. Останні відносяться до способу ЛГМ. Здебільшого, для моделей, застосовуваних в процесі ЛГМ, описаний нижче спосіб виробництва дасть найбільший корисний ефект. Для інших полістирольних виробів цим способом AB можна друкувати декоративні, технічні чи побутові вироби, подібні до тих, що широко виробляють з полістиролу чи ППС.

Серед патентів за темою утилізації відходів ППС шляхом виготовлення конструкцій відомий спосіб застосування відходів ППС при їх подрібненні до часток 1–3 мм, змішуванні з відходами фібри у об'ємному відношенні 3 : 7 – 7 : 3 та виготовленні конструкційних виробів з використанням операції нагрівання [1]. В результаті наших досліджень створено технологію використання відходів ППС після їх термокомпактування [2, 3]. Таке компактування дає дисперсний сипкий матеріал підвищеної насипної густини (порівняно з ППС) для зручного його дозування при змішуванні з мінеральною сировиною та виробництва з такого композиту плитки для підлоги громадських будівель, панельної облицювальної плитки, тротуарної плитки, кришок люків та водозливних решіток тощо.

Застосування відходів ППС за такими способами сприяє збереженню навколишнього середовища, бо в теперішній час, як зазначено [2, 3], відходи ППС мало застосовуються, а отже вони прогресивно накопичуються, створюючи серйозну загрозу екології довкілля. У 2016 р. світове виробництво полістиролу становило близько 14,7 і ППС – 6,6 млн метричних тонн на рік [4], при чому понад 40 % – застосовували для упаковки, яка іде у відходи, часто розосереджені за численними потоками побутового походження [3]. Серед методів ліквідації твердих побутових відходів в даний час найпоширенішим вважають складування на полігонах, на які вивозиться 85–90 % відходів, ~10 % утилізується шляхом спалювання і не більше 5 % утилізується іншими методами [5]. Проте ППС не гниє, як природні органічні відходи, і його не дозволено спалювати без дії каталізаторів через утворення шкідливих речовин [3], які виносять гарячі гази з не зовсім окисленими (до CO_2 і H_2O) органічними сполуками.

Значна кількість відходів утворюється в ливарних цехах ЛГМ при виготовленні моделей з ППС (>10 % [4]), особливо для разового та дрібносерійного лиття при вирізання моделей з блочного ППС. Нині все більше поширюється механічне вирізання моделей на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), які ще називають 3D-фрезерами. Цей процес, як і процес 3D-друкування, пов'язаний з цифровізацією виробництва, що дозволяє без паперових креслень з цифрової моделі за комп'ютерними програмами автоматично виготовляти полімерні моделі, як приклад перетворення цифрового (інформаційного файлу) у фізичне (матеріальне) утворення, термін: *digital-to-physical conversion*) у вигляді ливарної моделі.

При цьому відходи ППС не можна знищити на ливарних підприємствах, як зазначено вище [3], ці відходи легковагі, тому мають значний об'єм, нерозчинні для води і не піддаються біологічному розкладанню, тому такі відходи потребують окремого збору, пакування і вивезення сторонніми організаціями для захоронення

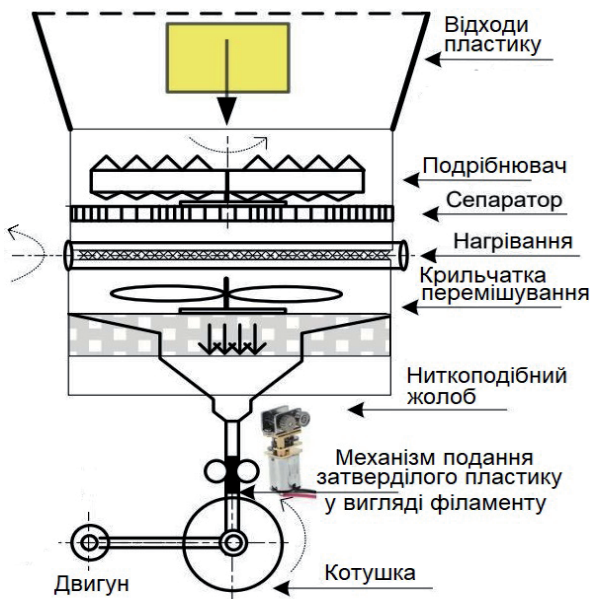


Рис. 1. Схема установки для переробки пластику, як пропозиція для проектування

чи утилізації. Це звісно збільшує собівартість литої металопродукції, а виготовляти вироби за способами [1, 2] ливарникам не вигідно, бо на цьому спеціалізуються заводи іншої галузі – з випуску будматеріалів чи продукції з полімерів.

В окремих публікаціях ставиться завдання навчитися переробляти 3D-пластик, що відпрацював свій «життєвий» термін, або полімерні 3D-моделі з дефектами, недоліками чи невдалі копії виробів, що моделюються. До проектування пропонується схема установа для отримання філаменту з відходів такого пластику (рис. 1) [6]. Але 3D-пластик, що нині застосовується, зарубіжного виробництва і здебільшого не призначений для повторного використання в 3D-друці (за гарантійними умовами експлуатації 3D-принтерів). Крім того, для разових ливарних моде-

лей, як описано нижче, потрібен пластик зі спеціальними властивостями.

Серед прикладів застосування АВ в ливарному виробництві відомий 3D-друк полімерних моделей, що випаляються з виготовлених за ними разових оболонкових форм [7, 8]. Терміни «АВ» і «3D-друк» використовуються як синоніми. Для лиття металу за моделями, що випаляються, аналогічно методу Replicast-CS (Shell molding refractory) [9], виготовляють піщану чи керамічну вогнетривку оболонкову форму (4–5 шарів зі зв'язувальним матеріалом) по типу лиття за моделями, що витоплюються. Для цього типу лиття характерна висока собівартість виливків, бо оболонкові форми, як правило, наносять на разову модель пошарово з тривалими сушкою і наступним випалюванням з них полімерних моделей.

Складність випалювання пластикової моделі виливка, як описано в роботі [8], пов'язана з небезпекою руйнування керамічної ливарної оболонки. Теоретично можна підібрати режим нагрівання, при якому пластик моделі втратить міцність раніше, ніж зруйнує оболонку. У зарубіжних звітах вказується, що при випалюванні FDM-моделей фірми використовують різні режими нагрівання, відпрацьовані у своєму виробництві. Однак такий підхід потребує зміни температури залежно від часу за певним законом, який має певні вимоги до виконання операції та обладнання.

Для спрощення процесу випалювання моделі та гарантованого збереження оболонки в роботі [8] прийняли рішення виготовити модель пустотілою, тонкостінною. Перед формуванням у ливарну оболонку на короткий час заливали розчинник (ацетон), що послаблює пластикову модель. Потім розчинник зливали, а оболонку наповнювали негорючим газом. У цих умовах використовували аргон. Після такої операції модель, що втратила міцність, мала меншу можливість зашкодити ливарній оболонці. Випалювання проводили в печі при температурі 920...950 °С.

В результаті експериментів встановлено, що при відносно великій масі випалюваного матеріалу після багатогодинного процесу у формі залишалася велика кількість золи [8]. Оскільки точний склад ABS-пластика, що застосовується у FDM (Fused deposition patterning)-технології АВ, невідомий, зольний залишок піддали рентгеноструктурному якісному фазовому аналізу та виявили в ньому лише вуглець (рис. 1, а) [8]. Зменшення маси матеріалу, що випаляється, і продування форми після прожарювання стисненим повітрям підвищують чистоту ливарної форми.



Рис. 2. Зольний залишок (а) та виливки, отримані з використанням випалюваних FDM-моделей (б) [8]

Однак найкращі результати дало охолодження форми після випалювання та її промивання водою. У цьому випадку перед заливанням форму знов прожарювали по традиційному циклу. Отримані виливки мали хорошу якість поверхні (рис. 2, б) [8].

Спроба лиття методом ЛГМ також була виконана вітчизняними дослідниками [10]. Для друку було обрано три різні пластики ABS, HIPS, PLA. Експериментальні моделі роздруковували з товщиною стінок 1 мм та внутрішньою матрицею (рис. 3, а, б). Елементи ливникової системи виготовляли з пінопласту окремо. Заливання проводили алюмінієм в піщану вакуумовану форму. На жаль, ні один із проведених експериментів не мав успіху. Всі з перерахованих вище пластиків мають занадто щільну структуру, яка повністю не газифікується під впливом рідкого металу. Найбільш близькою до газифікації, була модель, виготовлена з нитки HIPS [10]. Незважаючи на точно отриману конфігурацію експериментальної моделі, верхній шар пластику розплавився та пригорів до поверхні форми. Найбільш вдалий отриманий виливок показано на рис. 3, в.

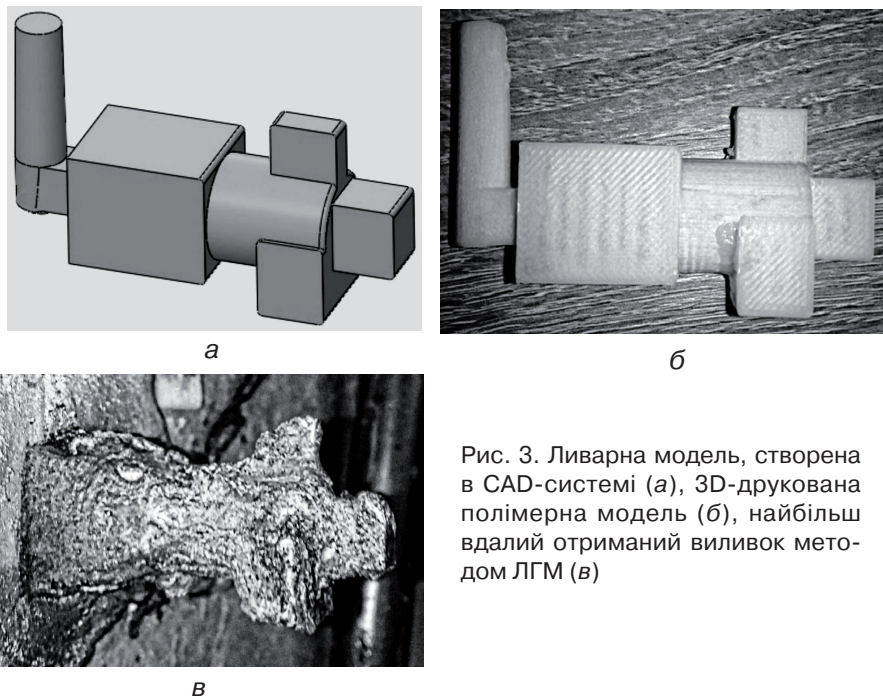


Рис. 3. Ливарна модель, створена в CAD-системі (а), 3D-друкована полімерна модель (б), найбільш вдалий отриманий виливок методом ЛГМ (в)

З проведеного експерименту зроблено висновок, що необхідно підібрати або ж розробити нитку-філамент для друку, яка б повністю газифікувалась при контакті з розплавом. Це дозволить значно зменшити газовиділення та скоротити цикл отримання виливків.

Серед прикладів АВ при відпрацюванні конструкцій полімерних моделей у ФТІМС НАН України показано моделі на рис. 4, де 1 – лопатка (лопата) ГТД, 2 – її комірчаста серцевина, 3 – повздовжній канал

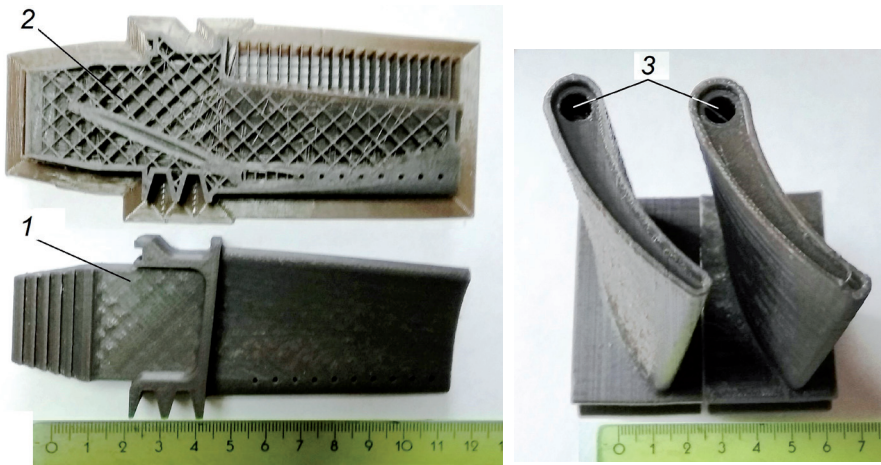


Рис. 4. Приклади друку ливарних моделей лопаток ГТД на 3D-принтері, де 1 – зовнішній вигляд лопатки, 2 – її комірчаста серцевина, 3 – повздовжній канал

З розглянутих експериментів очевидно, що значно нижчою була б собівартість виливків за полімерними друкowanymi моделями при ЛГМ, ніж за моделями, що ви-топлюються. Але маса друкowanymi моделей на одиницю об'єму вища від моделей з ППС, відповідно, і газотвірність з ростом пікових тисків утворюваного газу від спроб їх газифікації у формі. Також друкowanymi моделі мають більші твердий залишок і зольність, що покриває поверхню форми, ніж моделі з ППС, що погіршує якість виливків і є перешкодою того, що друкowanymi моделі практично не застосовують для ЛГМ за традиційною технологією, описаною в класичній монографії [9]. Зарубіжні компанії зараз роблять лише окремі перші спроби створення легкоплавких матеріалів для 3D-друку разових моделей, газифікація яких могла б наблизитись до відпрацьованих моделей з ППС.

Моделі прагнуть адитивно виготовити якомога більш порожнистими, щоб скоротити розходи матеріалу і зменшити витрати на нього [7]. За описами [10, 11], моделі друкують із спеціально виготовленої нитки (філаменту) товщиною 1,75 мм, потім після тривалого виготовлення керамічних форм такі моделі з них випалюють прожарюванням у печах з видаленням випалених газів з цеху. Друк моделей з імпортного ниткового матеріалу дорогої вартості, що не випускається серійно в Україні, разом з операцією випалювання підвищує вартість виливків в кілька разів, порівняно з традиційним способом ЛГМ. Крім філаменту, також відомо про початок застосовування плавкого гранульованого матеріалу, що має незначно меншу вартість і не випускається в Україні. Та інформація про його застосування для друку ливарних моделей (з їх специфікою) не виявлено, бо таке АВ тривимірних об'єктів часто є лише на рівні експерименту. Також на даному етапі йде лише дослідження АВ моделей з філаменту, що включає добавку ППС [11] чи механічну вставку з нього в конструкцію моделі як опору (для здешевлення), для способу лиття за моделями, що випалюються з оболонкових форм [11].

З метою створення способу АВ ливарних моделей (та будь-яких тривимірних об'єктів) для переведення з процесу лиття за 3D-друкowanymi моделями, що випалюються, на більш економну технологію ЛГМ у вакуумованих формах з сипкого піску нами запропоновано використання відходів ППС від виробництва моделей для ЛГМ за місцем їх утворення як метод їх утилізації. Це науково-технологічне рішення обґрунтовано результатами наших досліджень і полягає в тому, що в способі

АВ ливарних моделей, який включає процес витікання формотвірного матеріалу із сопла, переміщуваного в просторі за заданою програмою траєкторією, в якості формотвірного матеріалу застосовують розплав подрібнених відходів ППС. Також в якості таких подрібнених відходів можливо застосувати відходи чи стружку при виготовленні ППС-виробів на верстатах з ЧПУ (3D-фрезерах). Крім того, в якості подрібнених відходів ППС доцільно застосовувати його термокомпактовані відходи [12].

Матеріал ППС давно відпрацьований для ЛГМ, його відходи мають невеликі показники міцності і твердості, тому їх легко дробити чи молоти. В дослідному варіанті, для подрібнення, застосовували млин лабораторний Bizon 850 з об'ємом циліндричного бункера 850 мл, потужністю 1500 Вт, виробництва КНР, що є в продажу на українському ринку. Подрібнення кускових відходів ППС, що поміщали у цей бункер, прискорювали притисканням зверху оправкою чи плунжером (відповідного розміру до діаметра бункера) цих відходів без торкання оправки чи плунжера до подрібнювальних лез, що обертаються.

При відпрацюванні в лабораторії режимів отримання з сипких подрібнених відходів ППС тонкого струменя розплаву в найпростішому варіанті застосовували клейовий пістолет, що серійно випускається для з'єднання деталей розплавом полімеру з температурою 120–150 °С, в який заправляють клейові стрижні діаметром 11,2 мм і нагрівають їх подачею електроживлення на ТЕН в нагрівальній камері поряд з соплом. Серійно випускаються також пістолети для клейових стрижнів $\varnothing 12$ мм та з нагріванням до 200 °С. Замість такого стрижня вставляли металеву трубку, по якій під тиском подавали подрібнені відходи ППС. При цьому з термопістолета при нагріванні з сопла виходив струмінь розплаву полістиролу $\varnothing 3$ мм відповідно до швидкості подання крізь трубку подрібнених відходів ППС. Це експериментально довело придатність подрібнених відходів ППС для дозованого та регульованого витікання їх розплаву у вигляді формотвірного матеріалу із сопла.

Виготовлення ливарних моделей та інших виробів механічною обробкою блоків чи плит з ППС на верстатах з ЧПУ (3D-фрезерах для обробки полімерів, дерева чи легких сплавів), десятки різновидів яких є на ринку України, супроводжують відходи – дрібна розсипчаста стружка ППС, яку видаляють з зони фрезерування по трубопроводу місцевою витяжною вентиляцією на кшталт дії пиłosоса (пиловловлювача). Такі відходи часто не потребують додаткового подрібнення і придатні як матеріал для АВ ливарної моделі чи іншого тривимірного об'єкту, як технічного, так і декоративного чи моделей, що застосовують для макетування чи рекламних інсталяцій.

Термокомпактовані відходи ППС – це подрібнені до розмірів 15–20 мм відходи ППС, отримані температурним впливом (нагрівання при температурі ~ 140 °С протягом 5 хв), що зменшує об'єм ППС у ~ 20 разів [2, 3] та дозволяє вводити їх в ємність для подачі в екструдер значно менших розмірів, ніж потрібні такі для подрібнених відходів ППС. Такі компактовані відходи (як аналоги грануляту) потребують значно меншого простору для складування і дозволяють збільшити (порівняно з типовими відходами ППС) масовий потік сировини в установках 3D-друку, який вимірюється в одиницях маси за одиницю часу.

Сипкі подрібнені відходи пластиків лише недавно почали вживати в пристроях адитивного формування крізь екструдер, у якому поєднують, аналогічно патенту [2], процеси дозування, пресування, нагрівання та витікання з сопла. В 3D-принтерах для друку із подрібненого пластику або пластикових гранул є чан або бункер, куди завантажується сировина, що подається на гарячу головку 3D-принтера (рис. 5) [13], як це роблять з ниткою-філаментом.

Спосіб [12] відповідає тенденції поширення АВ у ливарному виробництві. З часом друковані полімерні моделі стануть все дешевшими, чистота поверхні їх вища ніж у моделей з ППС. 3D-друк дозволяє в автоматичному режимі виготовити цільними такі конструкції, які для моделей з ППС лише можна було б зібрати з кількох частин. Подвійна економія полягає в: 1) утилізації відходів ППС в ливарних цехах за місцем їх утворення одночасно з; 2) АВ з них моделей при заміні лиття за моделями, що

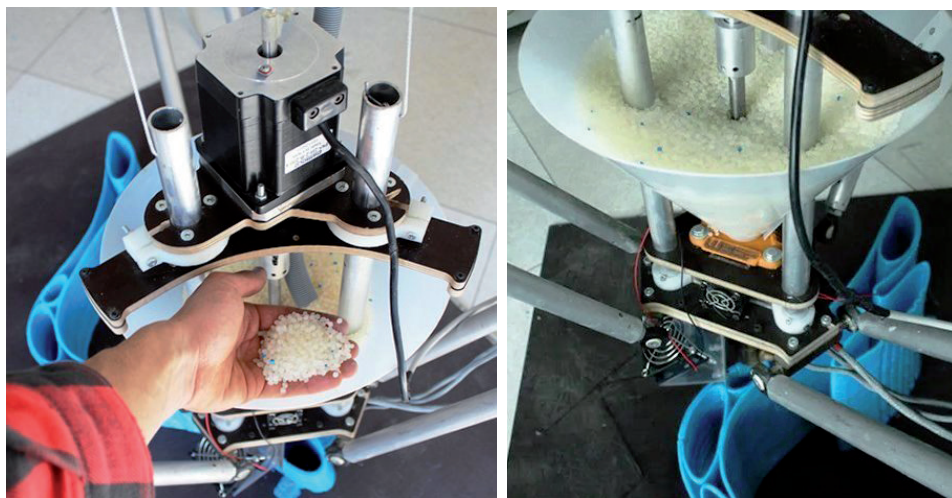


Рис. 5. Приклад 3D-принтера для друку з подрібненого пластику або пластикових гранул

випалюються, на ЛГМ у формах з сипкого піску. Адже практично з того ж самого матеріалу (за величинами твердого залишку і зольності) – утилізованого ППС адитивно виготовляються моделі.

Для ЛГМ моделі друкують оболонковими з порожниною, заповненою тонкими (комірчастими) розпірками між протилежними стінками, лише аби пісок, що засипають у форму, не деформував стінки. Цим наближають масу друкованої моделі до маси такої ж моделі з ППС, що відпрацьована для ЛГМ-процесу. Якщо питома вага друкованої моделі надто висока, то застосовують нові способи ЛГМ з виведенням надлишку газів від газифікації моделі крізь вентиляційний канал у моделі і трубчастий випор за межі форми і їх окисленням, зокрема за способом [14]. Така нейтралізація газоподібних відходів при ЛГМ слушно доповнює утилізацію твердих відходів ППС як сировини для АВ ливарних моделей, разом ці способи дають синергійний ефект щодо екологічного збереження довкілля, покращення умов праці ливарників та зниження собівартості литої продукції разом з підвищенням її якості.

Список літератури

- 1 Патент 2024558 РФ, С1, С08J 11/12. Способ получения композиционного материала / А. Б. Корженевский, В. А. Бурмистров, И. А. Овечкин. Оpubл. 15.12.1994.
- 2 Патент 82838 Україна, МПК С08J 11/04. Спосіб одержання полімерного композиційного матеріалу / О. Й. Шинський, А. О. Стрюченко, В. С. Дорошенко, И. О. Шинський та ін. Оpubл. 12.08.2013, Бюл. 15.
- 3 Шинский О. И., Тихонова О. А., Стрюченко А. А., Дорошенко В. С. Исследование процессов термокомпактирования отходов пенополистирола. *Твердые бытовые отходы*. 2011. № 4. С. 48–50.
- 4 Uttaravalli A.N., Dinda S. & Gidla B.R. (2020). Scientific and Engineering Aspects of Recycling and Reuse of Expanded Polystyrene Waste for Various Potential Applications: A Review. *Process Safety and Environmental Protection*, 137, 140–148.
- 5 Трунилина А. В., Баурова Н. И. Полимерные композиты со свойствами биodeградации. Все материалы. *Энциклопедический справочник*. 2019. № 1. С. 9–13.
- 6 Винниченко А. В., Назаревич С. А. Разработка технического решения для итеративной филаментизации 3D-пластика / Материалы II всеросс. научн. конф. Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. 19–23.04.2021. Сб. докл. СПб.: ГУАП, 2021. С. 107–111.

- 7 Митраков Г. Н., Евдокимов С. Н., Лаврик Е. Г., Сазонов В. С. Использование аддитивных технологий при литье по выжигаемым моделям. *Омский научный вестник*. 2015. № 2. С. 80–84.
- 8 Литье стали по выжигаемым аддитивным моделям / П.А. Андрианов, А.Е. Колмаков, М.М. Уткин / Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 4. С. 346–344.
- 9 Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
- 10 Цифровые технологии в литейном производстве / Ю. И. Гутько, А. Н. Голофаев, Н. А. Тараненко, В. С. Мирошниченко. Инновационные технологии в литейном производстве: Сборник трудов Международной научно-технической конференции, (22–23 апреля 2019 г., Москва) / под ред. К. А. Батышева, К. Г. Семенова. М.: ИИУ МГОУ, 2019. С. 330–333.
- 11 Прохорчук Е. А., Трапезников А. В., Ларионов С. А., Соколов А. В. Исследование и выбор оптимального состава филамента для 3D-печати литейной выжигаемой модели. *Литейное производство*. 2021. № 4. С. 23–27.
- 12 Патент 151359 Україна, МПК В22С 9/02, В22С 15/02. Спосіб адитивного виробництва полістирольної ливарної моделі чи іншого тривимірного об'єкту складної конфігурації / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко, П. Б. Калюжний та ін. Опубл. 13.07.2022. Бюл. № 28.
- 13 Ile Kauppila. 3D Printing From Plastic Waste: 10 Successful Projects. Sep 20, 2021. URL: <https://all3dp.com/1/3d-printing-from-plastic-waste/>
- 14 Патент 147217 Україна, МПК В22С 7/02, В22С 9/04. Спосіб лиття металу за моделями, що газифікуються, з окисленням продуктів газифікації / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. Опубл. 24.04.2021, Бюл. 16.

Надійшла 13.10.2022

References

- 1 Patent 2024558 RF, C1, C08J 11/12. Method for obtaining a composite material / A. B. Korzhenevskij, V. A. Burmistrov, I. A. Ovechkin. Publ. 15.12.1994. [in russian].
- 2 Patent 82838 Ukrayina, MPK S08J 11/04. Method for maintaining a polymer composite material / O. J. Shinskij, A. O. Stryuchenko, V. S. Doroshenko, I. O. Shinskij et al. Publ. 12.08.2013, Bull. 15. [in Ukrainian].
- 3 Shinskij O. I., Tihonova O. A., Stryuchenko A. A., Doroshenko V. S. (2011) Study of the processes of thermal compaction of polystyrene waste. *Tverdye bytovye othody*. No 4. P. 48–50. [in russian].
- 4 Uttaravalli A. N., Dinda S. & Gidla B. R. (2020) Scientific and Engineering Aspects of Recycling and Reuse of Expanded Polystyrene Waste for Various Potential Applications: A Review. *Process Safety and Environmental Protection*, 137, 140–148.
- 5 Trunilina A. V., Baurova N. I. Polymer composites with biodegradation properties. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik*. 2019. No 1. P. 9–13. [in russian].
- 6 Vinnichenko A. V., Nazarevich S. A. (2021) Development of a technical solution for iterative filamentization of 3D plastic / *Materialy II vsross. nauchn. konf. Modelirovanie i situacionnoe upravlenie kachestvom slozhnyh sistem*. 19–23.04.2021. Sb. dokl. SPb.: GUAP, 2021. P. 107–111. [in russian].
- 7 Mitrakov G. N., Evdokimov S. N., Lavrik E. G., Sazonov V. S. (2015) The use of additive technologies for casting burned models. *Omskij nauchnyj vestnik*. No 2. P. 80–84. [in russian].
- 8 Andrianov P. A., Kolmakov A. E., Utkin M. M. (2019) Steel casting according to burnt out additive models. *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki*. Issue. 4. P. 346–344. [in russian].
- 9 Shulyak V. S. (2007) Casting on gasified models. SPb.: NPO «Professional», 408 p. [in russian].

- 10 Digital technologies in foundry production / Yu. I. Gutko, A. N. Golofaev, N. A. Taranenko, V. S. Miroshnichenko. *Innovacionnye tehnologii v litejnom proizvodstve: Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, (22–23 april 2019, Moskow) / pod red. K. A. Batysheva, K. G. Semenova. M.: IIU MGOU, 2019. P. 330–333. [in russian].
- 11 Prohorchuk E. A., Trapeznikov A. V., Larionov S. A., Sokolov A. V. (2021) Research and selection of the optimal filament composition for 3D printing of a cast-out model. *Litejnoe proizvodstvo*. No 4. P. 23–27. [in russian].
- 12 Patent 151359 Ukrayina, MPK B22C 9/02, B22C 15/02. The method of additive variation of a polystyrene liquor model of another trimer object with a folding configuration / O. J. Shinskij, V. S. Doroshenko, P. B. Kalyuzhnyj et al. Publ. 13.07.2022, Bull. 28. [in Ukrainian].
- 13 Ile Kauppila. 3D Printing From Plastic Waste: 10 Successful Projects. Sep 20, 2021. URL: <https://all3dp.com/1/3d-printing-from-plastic-waste/>
- 14 Patent 147217 Ukrayina, MPK B22C 7/02, B22C 9/04. The method of casting metal for models that are gasified, for oxidizing gasification products / O. J. Shinskij, V. S. Doroshenko. Publ. 24.04.2021, Bull. 16. [in Ukrainian].

Received 13.10.2022

O. Y. Shinsky, *Dr. Sci. (Endin.)*, Head of Department

O. V. Mikhnyan, *PhD (Engin)*, Senior Researcher; e-mail: mixnyan@ukr.net;
ORCID 0000-0003-3210-4173

O. V. Neima, *leading Researcher*; e-mail: neima_alex@ukr.net;
ORCID 0000-0001-5438-7253

V. S. Doroshenko, *Dr. Sci. (Endin.)*, Senior Researcher

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

ADAPTATION OF THE PROCESS OF ADDITIVE PRODUCTION OF PATTERNS FOR THEIR GASIFICATION IN SAND FORM DURING METAL POURING, AS WELL AS FOR THE DISPOSAL OF POLYSTYRENE FOAM WASTE

The technological method in the field of foundry production is described, which combines additive manufacturing (AM) of disposable foundry polymer patterns with waste polystyrene (EPS) waste disposal. It was created to switch to the method of Lost Foam casting on gasified patterns (LFC), from the current method of casting on printed patterns of fired. The latter method is used because modern printed patterns have a high density and ash content, which degrades the quality of metal castings when used for LFC. EPS disposal gives an environmental effect, and AM patterns are an example of the spread of digitalization and automation of foundry production. Examples of EPS disposal, examples of castings after firing additively manufactured patterns and the ash residue, consisting of carbon, found in the working cavities of molds after firing such patterns are described. Examples of printing patterns with a cellular core and a ventilation channel are shown, an unsuccessful example of aluminum casting by the LFC method in a vacuumed sand mold, as well as an example of a 3D printer for printing using crushed plastic or plastic granules. The developed method of printing one-time foundry patterns for gasification in sand foundry mold corresponds to the trend of spreading AM in foundry production. If the specific weight of the printed pattern is too high, then new LFC methods are used with the removal of excess gases from the gasification of the pattern through the ventilation duct in the pattern and tubular evaporation outside the mold and their oxidation, in particular by our method. Such neutralization of gaseous waste at LFC rightly complements the utilization of EPS solid waste as a raw material for AM foundry patterns, together these methods give a synergistic effect on environmental protection, improving the working conditions of foundries and reducing the cost of cast products while improving its quality.

Keywords: Lost Foam casting; gasified patterns; 3D printing; additive manufacturing; one-time patterns; burning patterns; expanded polystyrene; disposal of polymer waste.