

<https://doi.org/10.15407/plit2022.03.027>

УДК 621.74.045

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

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

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

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

П. Б. Калюжний, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;

e-mail: kpb.ptima@gmail.com,; ORCID 0000-0002-1111-4826

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

ORCID 0000-0001-5438-7253

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

МЕТОДИ ПОЄДНАННЯ ВАКУУМНО-ПЛІВКОВОЇ ФОРМОВКИ З ЛИТТЯМ ЗА ДРУКОВАНИМИ МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ

Використання технології 3D-друку або адитивного виробництва (АВ) все більше поширюється у промисловому виробництві. Концепція найбільш простого і низьковитратного впровадження 3D-друку в вітчизняне ливарне виробництво, яку найбільш нескладно і вигідно реалізувати через технологію лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), потребує створення ряду підпорядкованих цій концепції технологій, що стануть передумовами такого впровадження. Дослідження присвячене розробці способів швидкого автоматизованого виробництва разових полімерних моделей з показниками, близькими до традиційних моделей з пінополістиролу (ППС), використовуючи 3D-друк на широко поширених нескладних принтерах. Описано появу на світовому ринку легких полімерних і утворюючих піну ниток, що спінуються при підвищених температурах, а шари традиційної щільності утворюють при більш низьких температурах друку. Наведено приклади друкованих виробів з піноматеріалів. Такі пінопластові та легкі матеріали для 3D-друку, як нитки, так і гранули, поки знаходяться в «зародковому» стані, щоб їх впроваджувати для ЛГМ. Нами розроблено і патентується матеріал для разової моделі та спосіб її друку з подрібнених відходів ППС з метою наблизити показники виробів з нього, до таких властивостей відпрацьованих традиційних моделей з ППС. Запропоновано концепцію формування за друкованою разовою моделлю, яку «перетворюють» в оболонкову, а ливарна форма при цьому стає подібною до форми при вакуумно-плівковій формовці. Застосування традиційних для ВПФ випорів дає можливість виводу надлишків газу крізь них при заливанні металом і газифікації оболонкової моделі в разі, якщо вакууму форми буде недостатньо, щоб відсмоктати ці гази в пісок форми. Також розроблено метод застосування «в парі» 3D-принтера і 3D-фрезера для друку і видалення «надлишків» друку. А позиціонування і міцна фіксація в вакуумованому піску, як у кондукторі, виробів складної геометрії придатне для механічної обробки будь-яких деталей з металу чи пластику.

Ключові слова: вакуумно-плівкова формовка, друковані моделі, лиття за моделями, що газифікуються, 3D-друк, адитивне виробництво, ливарне виробництво, відходи ППС.

Використання технології 3D-друку або адитивного виробництва (АВ) стає все більше поширеним і важливим у промисловому виробництві. Концепція найпростішого і низьковитратного впровадження 3D-друку в вітчизняне ливарне виробництво, яку найбільш нескладно і вигідно реалізувати через технологію лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), потребує створення ряду підпорядкованих цій концепції технологій, що стануть передумовами такого впровадження. Тому передусім необхідно розробити способи швидкого автоматизованого виробництва разових полімерних моделей з показниками, близькими до традиційних моделей з пінопластиролу (ППС), використовуючи 3D-друк на широко поширених нескладних принтерах. Зараз такі порівняно низько бюджетні принтери нерідко називають «шкільними», маючи на увазі їх поширення для навчання дітей в школі азам 3D-друку.

Проблема застосування друківаних моделей для ЛГМ полягає в тому, що теперішні їх характеристики відрізняються від таких для відпрацьованих традиційних моделей з ППС тим, що при спробах їх газифікації дають значний вуглецевий залишок (зольність), вищу температуру газифікації, а також мають більшу вагу на одиницю об'єму, що збільшує кількість (і тиск) газів в порожнині форми, які негативно впливають на процес заміщення металом моделі. Ці причини поки перешкоджають отриманню виливків високої якості при ЛГМ за друківаними моделями.

Останнім часом на світовому ринку почала з'являтися так звана легка нитка, яку застосовують для друку від високопродуктивного спортивного спорядження до авіамodelей літаків [1]. Спінені нитки, спінені гранули та надлегкі нитки є легшими за вагою і альтернативними традиційним полімерам для друку PLA або PETG. Однією з особливостей є нова поліпропіленова нитка від компанії Infinite Material Solutions, ця нитка розроблена для друку рівномірно пористих частин, які нагадують 3D-надруківаний пінопласт. Він має водорозчинний етап кінцевої обробки, при якому частково розчинюється і стає більш однорідним губчастим і легшим, що робить його придатним для конкретних застосувань з отриманням неперервної мікропористої морфології. Для друку легких деталей з точними розмірами спочатку важливо визначити можливе розширення матеріалу. Це можна зробити шляхом друку тестових кубів одного периметра без верхнього і нижнього суцільних щільних шарів.

Матеріал VarioShore TPU – це ще один продукт із властивостями, що регулюються температурою [1]. При температурах від 200 до 250 °C матеріал розширюється приблизно в 1,5 рази від початкового об'єму. Це означає, що матеріалом можна друкувати з низькими витратами (60–70 %), щоб компенсувати активне піноутворення, що в свою чергу дає дуже м'які друківані частини. При температурі від 190 до 200 °C цим матеріалом можна друкувати без спінування, що призводить до більш твердих шарів порівняно зі спіненими зразками. Такі пінопластові та легкі матеріали для 3D-друку (як нитки, так і гранули) поки знаходяться в «зародковому» стані [1], щоб їх впроваджувати для ЛГМ, незважаючи на те, наскільки добре показали себе нинішні продукти (рис. 1).

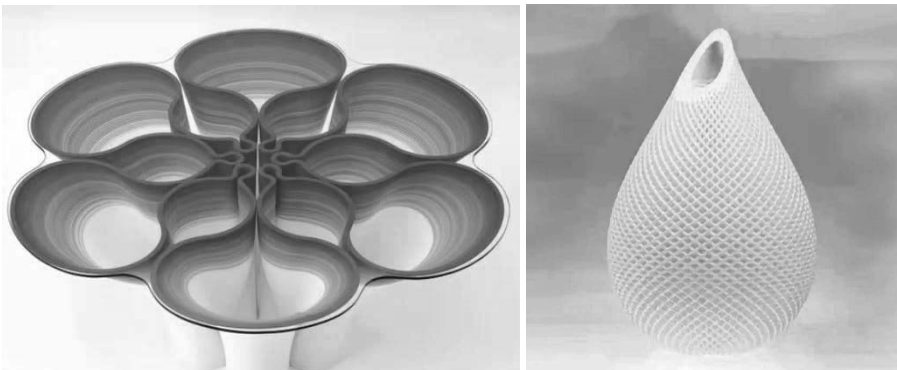


Рис. 1. Приклади друківаних виробів з піноматеріалів [1]

Стосовно нашого вкладу, то відділом проф. О. Й. Шинського розроблено і запатентовано [2] матеріал для разової моделі та спосіб її друку з подрібнених відходів ППС з метою наблизити показники виробів з нього до таких властивостей відпрацьованих традиційних моделей з ППС. При чому для збільшення пластичності (зниження крихкості) і змотування отриманого філамента на котушки рекомендовано додавання до відходів ППС такого відпрацьованого А. А. Стрюченком екологічно безпечного розчинника-пластифікатора, як живичний скипидар. Щодо виготовлення разової моделі мінімальної маси (оболонкового типу) разом з методами ослаблення тиску газів від газифікації моделі чи їх нейтралізації, то 3D-технології мають значний потенціал для цього, що розглянуто нижче.

При 3D-друкуванні легковагих полімерних виробів їх нерідко виконують оболонковими з пористою чи каркасною серцевиною, яку заповнюють каркасами такого типу (рис. 2).

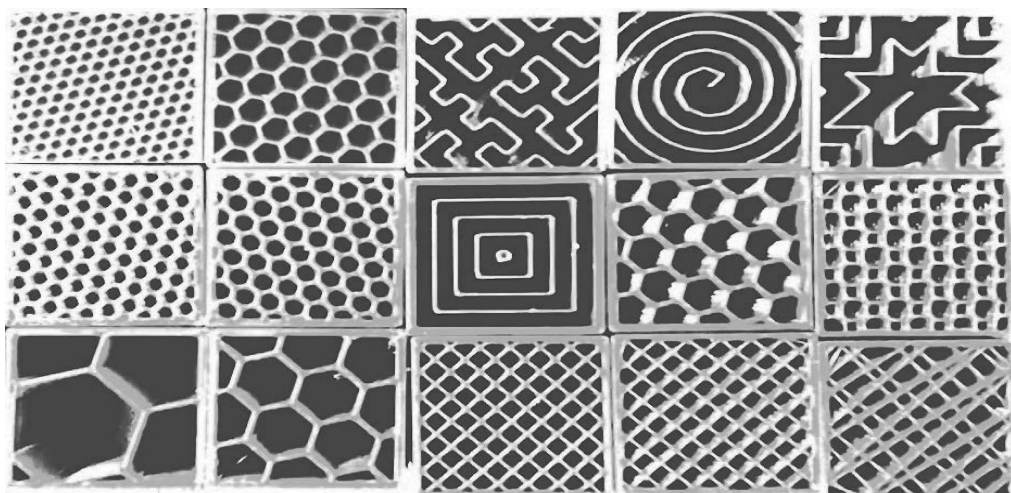


Рис. 2. Типові приклади заповнення друківаних виробів [3]

Нами також запропоновано для моделей складного профілю (типу крупних лопаток ГТД), які можна друкувати з двох половинок, наступний спосіб виготовлення. Задача полягала в тому: як отримати модель мінімальної маси. На горизонтальному столі друкують знизу на стовпчастих чи каркасних підтримуючих опорах (підпорах) половину оболонкової моделі з гладкою (з вищою чистотою поверхні, ніж при ЛГМ) зовнішньою поверхнею. Опори друкованої половини моделі зміцнюють конструкцію, але і збільшують масу. Якщо видалити з неї ці опори, то оболонка може покоробитись при виготовленні піщаної форми, що приведе до браку виливка. Тому пів-модель вирішили заформувати на модельній плиті сухим піском за методом вакуумно-плівкової формовки (ВПФ) в рамковій опоці з фільтрами для вакуумування. В результаті отримали робочу порожнину півформи, заповнену пів-моделью (без покриття моделі синтетичною плівкою), а плоскі піщані лад і контрлад були покриті такою синтетичною плівкою.

Потім цю виготовлену півформу підключили до вакуум-насосу, перекантували, поклали контрладом на плоску плиту і з половинки моделі вручну видалили всі підтримуючі опори, залишивши лише оболонку, яка була міцно притиснута вакуумом форми до піску. Тобто фактично виготовили півформу методом ВПФ, робоча порожнина якої була облицьована оболонкою від половини моделі без опор, притаманних 3D-друку. Ці опори в лабораторному варіанті видалили за допомогою фрези діаметром до 10 мм, вставленої в цанговий затиск ручного компактного електрогравера DT-05 18, це також можна виконати нагрітими лезами електропаяльника чи термоножа.

В промисловому варіанті пропонується перенести (на плоскій плиті) півформу

на стіл 3D-фрезера з відповідним позиціонуванням і закріпленням до стола цього фрезера, підключивши до неї вакуум, і видалити опори моделі фрезою 3D-фрезера за комп'ютерною програмою, аналогічною для 3D-принтера, що виконав друкування цієї моделі. При цьому також можна механічною обробкою на 3D-фрезері суттєво зменшити товщину оболонки моделі (до менше 1 мм), або навіть з суцільної пластикової моделі виготовити оболонкову, функція якої полягала б лише в герметизації піщаної вакуумованої форми (подібно до синтетичної плівки), що значно б зменшило потенційну зольність і газотвірність друкованої моделі.

Переносити з місця формовки до 3D-фрезера і на інші відстані на плоскій плиті півформи ладом доверху слід плавно без струсів у варіанті без вакуумування, або (надійніше) застосувати вакуумування за допомогою акумуляторного пилососа, невисокого рівня вакууму якого достатньо (як показала практика) для утримання неперушно (без зсуву) піску півформи з пів-моделлю.

По суті, описаний спосіб складається з таких операцій: формовки – ВПФ не (як традиційно) по постійній пів-моделі, а по разовій пластиковій друкованій, оболонку якої підтримують опори; вакуумування; видалення опор, що перетворює пів-модель в оболонку, яка покриває поверхню робочої (ливарної) порожнини півформи, і це можна вважати перетворенням методу ЛГМ в метод ВПФ [4]. Якщо зібрати форму з двох аналогічно виготовлених півформ, включно з виконанням ливниково-живильної системи, то отримаємо традиційну форму методу ВПФ з тою відмінністю, що робоча порожнина її облицьована половинками оболонкової друкованої моделі (наче товстою плівкою), з якої видалено раніше віддруковані опори і поверхня якої міцно присмоктана (притиснута) до піску вакуумованої форми. При цьому скріплений за допомогою вакууму пісок для оболонки моделі стає несучою опорою, яку раніше виконували пластикові опори (або внутрішній каркас, як на рис. 2), що при формовці опирались на модельну плиту.

Принагідно відмітимо докладніше, що такий спосіб позиціонування і закріплення на станку з ЧПУ або 3D-фрезері фасонного виробу непростой геометрії за допомогою вакуумованого сухого піску доступний не лише для виробів з полімерів, але і з металів. Якщо все більше виробляється (зокрема, друкується) деталей округлої, біонічної чи комірчасто-ґратчастої форми, які потребують швидкого міцного закріплення для фрезування, то новий метод полягає в тому, що замість опорних, кріпильних елементів, чи кондукторів для верстатного пристрою заготовка складної геометрії частково формується (заглиблюється) в сухому піску у рамковій опоці за методом ВПФ. При цьому відкриті зони піску перед вакуумуванням такої піщаної форми покривають-герметизують синтетичною плівкою, а поверхні заготовки контактують з піском, і вакуум, що підключають до форми, на них діє у вигляді низького тиску, що присмоктує поверхні заготовки до піску, а пісок при цьому монолітно «кам'яніє», що традиційно досягається за методом ВПФ. Контактний тиск піщаного середовища на бічну поверхню заготовки забезпечує опір зсуву при її механічній обробці. Виготовлена таким чином півформа в металевій опоці і з заготовкою кріпиться до столу фрезерного верстата за металеві фланці чи клеми, а вищерозглянутий метод є ефективним для закріплення заготовок складної форми на фрезерних верстатах.

Описаний метод застосування сухого піску в вакуумованій опочній формі як технологічного оснащення для кріплення та базування заготовки на столі верстата для механічної обробки, на нашу думку, значно простіший, ніж такі відомі види технологічного оснащення: магнітне, кріогенне та ін. Зокрема, розробці технології обробки деталей з базуванням серед затверділої в зовнішньому полі магнітно-реологічної рідини присвячено дисертацію [5], в якій зазначено, що вартість технологічного оснащення для цього може становити до 50 % собівартості продукції, особливо дрібносерійного виробництва, що стримує технічний прогрес у машинобудуванні. Для закріплення останнім методом заготовок з магнітних матеріалів рекомендовані реологічні середовища на основі машинного масла високої в'язкості з магнітними частинками діаметром до 1 мкм і з концентрацією (за об'ємом) близько 20 % заготовки, а для заготовки з немагнітних матеріалів рекомендовані реологічні середовища з

об'ємною концентрацією до 50 %, що дає змогу досягти питомих сил закріплення на магнітних столах верстатів для механічної обробки більшості типових заготовок [5]. Завершаючи цей епізод з рекомендованим перенесенням до технології механічної обробки операцій, притаманних ВПФ і відпрацьованих в ливарній галузі, продовжимо розгляд методів виготовлення піщаних форм за друкованими моделями.

Зокрема, після механічної обробки на 3D-фрезері з суттєвим зменшенням товщини частини оболонки друкованої моделі, що знаходиться у вакуумованій піщаній півформі, можливе подальше зменшення її маси за допомогою способу ВПФ [6] авторства Шинського О. Й. та ін. Відмінна особливість цього способу полягає в тому, що перед складанням форми з півформ синтетичну плівку, нанесену на робочу порожнину, поверхня якої контактує з металом і яку утворюють з двох півформ, піддають термодеструкції. Таким чином, оболонки друкованої з розплавленого термопластичного полімеру (у вигляді нитки-філаменту на принтері ФТІМС НАНУ) моделі (як аналог товстої синтетичної плівки) можливо піддати нагріванню за допомогою наближення до них електричного нагрівача з розігрітими ніхромовими спіралями [6], ТЕНОм, потоком гарячого повітря з будівельного електричного фену (зі звичними режимами включення на 300 чи 600 °С) тощо. Наприклад, в роботі [7] описано варіант застосування потоку кисню для деструкції моделі, а в статті [8] – подача на неї палаючого потоку ацетилену в суміші з киснем у співвідношенні 2:3.

При цьому зміною температури чи часу такого впливу досягають регульованого плавлення і часткового чи повного всмоктування полімеру оболонок моделей в піщану поверхню вакуумованих півформ з частковою термодеструкцією полімеру. В результаті, утворюється покритий чи (та) просочений і зв'язаний полімером поверхневий піщаний прошарок, характеристики якого корегують, крім вказаними заходами, величиною вакууму форми та газопроникністю протипригарного покриття, яке, як правило, наносять при ВПФ і ЛГМ на поверхню плівки чи разової моделі перед засипанням піску у рамкову чи контейнерну опоку на початку формовки. Таким чином, ми отримуємо традиційний варіант ВПФ, подібний до способу [6], відпрацьованого ще в 80-х роках минулого століття в цеху ФТІМС НАНУ.

Розглянемо ще такий описаний [9] варіант формовки за друкованою моделлю. Після видалення опор з моделі і видалення оболонок моделі з півформ ці оболонки збирають і склеюють. При цьому колишні опори замінюють брусками (вставками, болванами) з легкового ППС (або спеціально окремо друкованого каркасу), що вставляють всередину оболонок і слугують запобіжниками можливого деформування моделі при формуванні сухим піском з його вібраційним ущільненням за традиційним методом ЛГМ, який і застосовують при кінцевому виготовленні ливарної форми.

Таким чином, запропоновано концепцію формування за друкованою разовою моделлю, яку «перетворюють» в оболонкову, а ливарна форма при цьому стає подібною до форми при ВПФ. Застосування традиційних для ВПФ випорів дає можливість виводу надлишків газу крізь них при заливанні металом і газифікації оболонкової моделі в разі, якщо вакууму форми буде недостатньо, щоб відсмоктати ці гази в пісок форми. Також розроблено метод застосування «в парі» 3D-принтера і 3D-фрезера для друку і видалення «надлишків» друку. А позиціонування та міцна фіксація в вакуумованому піску (як у кондукторі) виробів складної геометрії придатне для механічної обробки будь-яких деталей з металу чи пластику.

Список літератури

- 1 Daniel Temprado. Foam & Lightweight Filament – How and Why to 3D Print with It. Jun 9, 2022. URL: <https://all3dp.com/1/foam-lightweight-filament-how-and-why-to-3d-print-with-it/>
- 2 Рішення від 17.01.2022 по заявці u202105814 Україна, МПК: МПК8 B22C 9/02, B22C 15/02, B29C47/78. Спосіб адитивного виробництва полістирольної ливарної моделі чи іншого тривимірного об'єкту складної конфігурації / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко, П. Б. Калюжний, О. В. Михнян, О. В. Нейма. Заявлено 18.10.2021.
- 3 J. O'Connell. 3D Printing Infill: The Basics – Simply Explained. 24.02.2022. URL: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>

- Дорошенко В. С., Калюжний П. Б., Михнян О. В., Нейма О. В. Поєднання вакуумно-плівкової формовки з литтям за друкованими моделями, що газифікуються. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022*. Матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 28-29 квіт. 2022). Київ, 2022. С. 48–51.
- 5 Болдырев А. А. Разработка технологии чистовой обработки деталей с базированием в среде реологических жидкостей: дис... канд. техн. наук / Воронежский гос. техн. университет. Воронеж, 2013. 137 с.
- 6 А. с. СССР 1063528 А. М. Кл. В22С 9/02. Способ изготовления литейных форм вакуумной формовкой. Опубл. 30.12.1983, Бюл. № 48.
- 7 Дорошенко В. С. Нейтралізація газів при литті металу за моделями, що газифікуються, та передумови застосування для цього 3D-друкованих моделей. *Процеси лиття*. 2021. № 3. С. 32–43.
- 8 Дорошенко В. С. Знешкодження газів, які виділяються при литті за моделями, що газифікуються. *Метал і лиття України*. 2021. № 2. С. 64–71.
- 9 Дорошенко В. С. 3D друкована полімерна модель для газифікації у формі. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021*. Матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 28–29 квіт. 2021). Київ, 2021. С. 77.

Надійшла 16.06.2022

References

- 1 Daniel Temprado. Foam & Lightweight Filament – How and Why to 3D Print with It. Jun 9, 2022. URL: <https://all3dp.com/1/foam-lightweight-filament-how-and-why-to-3d-print-with-it/>
- 2 Rishennya vid 17.01.2022 po zayavci u202105814 Ukrayina, MPK: МПК8 В22С 9/02, В22С 15/02, В29С47/78. Method of additive production of polystyrene foundry model or other three-dimensional object of complex configuration / O. J. Shinskij, V. S. Doroshenko, P. B. Kalyuzhnyj, O. V. Mihnyan, O. V. Nejma. Zayavleno 18.10.2021. [in Ukrainian].
- 3 J. O'Connell. 3D Printing Infill: The Basics – Simply Explained. 24.02.2022. URL: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>
- 4 Doroshenko V. S., Kalyuzhnyj P. B., Mihnyan O. V., Nejma O. V. (2022). Combination of vacuum-film molding with casting by gasified printed patterns. *Novi materiali i tehnologiyi v mashinobuduvanni-2022*. Materiali XIV mizhnar. nauk.-tehn. konf. (Kyiv, 28–29 april 2022). Kyiv, 2022. P. 48–51. [in Ukrainian].
- 5 Boldyrev A. A. (2013). Development of technology for finishing parts based on rheological fluids: dis... PhD / Voronezhskij gos. tehn. universitet. Voronezh. 137 p. [In Russian].
- 6 A. s. SSSR 1063528 A, MPK В22С 9/02. A method of manufacturing casting molds by vacuum molding. Publ. 30.12.1983, Bull. № 48. [in Russian].
- 7 Doroshenko V. S. (2021). Neutralization of gases during metal casting by gasified patterns and prerequisites for the use of 3D printed patterns. *Casting Processes*. № 3. P. 32–43. [in Ukrainian].
- 8 Doroshenko V. S. (2021). Neutralization of gases emitted during casting by gasified patterns. *Metal i littya Ukraini*. № 2. P. 64–71. [in Ukrainian].
- 9 Doroshenko V. S. (2021). 3D printed polymer pattern for gasification in the mold. *Novi materiali i tehnologiyi v mashinobuduvanni-2021*. Materiali XIII mizhnar. nauk.-tehn. konf. (Kyiv, 28-29 april 2021). Kyiv. P. 77. [in Ukrainian].

Received 16.06.2022

V. S. Doroshenko, Dr. Sci. (Engin.), Leading Research Scientist;

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

O. V. Mikhnyan, PhD (Engin.), Senior Research Scientist; e-mail: mixnyan@ukr.net;

ORCID 0000-0003-3210-4173

P. B. Kaliuzhnyi, PhD (Engin.), Senior Research Scientist; e-mail: kpb.ptima@gmail.com;

ORCID 0000-0002-1111-4826

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

Physico-Techological institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

METHODS OF COMBINING V-PROCESS WITH LOST FOAM CASTING PROCESS ON GASIFIED PRINTED PATTERNS

The use of 3D printing technology or additive manufacturing (AM) is becoming more common in industrial production. The concept of the simplest and least expensive introduction of 3D printing in domestic foundry production, which is most easy and profitable to implement through the technology Lost Foam Casting (LFC) process, requires the creation of a number of subordinate technologies that will be prerequisites for such implementation. The study is devoted to the development of methods for rapid automated production of disposable polymer patterns with indicators close to traditional patterns of expanded polystyrene (EPS), using 3D printing on common simple printers. The appearance on the world market of light polymeric and foam-forming threads that foam at elevated temperatures and layers of traditional density form at lower printing temperatures is described. Examples of printed materials from foam materials are given. Such foam and lightweight materials for 3D printing, both threads and granules, are still in their infancy to be implemented for LFC. We have developed and patented a material for a single pattern and a method of printing it from shredded EPS waste in order to bring the performance of products from it, to such properties of used traditional patterns of EPS. The concept of molding according to the printed one-time pattern is proposed, which is "transformed" into a shell, and the foundry form becomes similar to the form in the V-process. The use of traditional for vapors allows the removal of excess gas through them during metal filling and gasification of the shell pattern in the event that the vacuum of the mold will not be enough to suck these gases into the sand of the mold. A method of using a "paired" 3D printer and a 3D milling machine for printing and removing "excess" printing has also been developed. Positioning and strong fixing in vacuum sand, as in the conductor, of products of difficult geometry is suitable for machining of any details from metal or plastic.

Keywords: V-process, printing patterns, Lost Foam Casting process, 3D printing, additive manufacturing, foundry production, EPS waste.